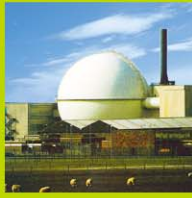
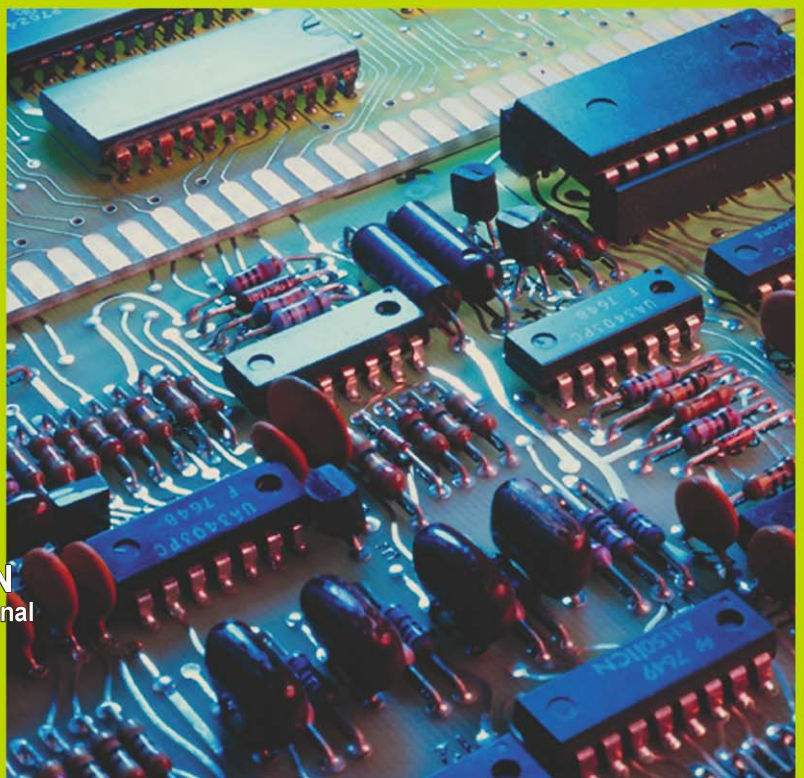


Joko Budiyanto

Fisika



Untuk SMA/MA Kelas XII



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Joko Budiyanto

FISIKA

Untuk SMA/MA Kelas XII



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

Fisika

Untuk SMA/MA Kelas XII

Disusun oleh:

Joko Budiyo

Editor : Diyah Nuraini
Design Cover : Desteka
Setting/Layout : Ike Marsanti, Esti Pertiwi

530.07

JOK
f

JOKO Budiyo

Fisika : Untuk SMA/MA Kelas XII /disusun Oleh Joko Budiyo ;
editor, Diyah Nuraini. — Jakarta : Pusat Perbukuan,
Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
viii, hlm: 298, illus.: 25 cm.

Bibliografi : 298

Indeks 296

ISBN 978-979-068-166-8 (no.jld.lengkap)

ISBN 978-979-068-175-0

1.Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul II. Diyah Nuraini

Buku ini telah dibeli hak ciptanya oleh
Departemen Pendidikan Nasional dari
Penerbit CV Teguh Karya

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2008

Diperbanyak Oleh:...

Kata Sambutan • • •

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2008, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Februari 2009

Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar ●●●

Puji syukur patut kalian panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat dan karunia-Nya kalian memperoleh kesempatan untuk melanjutkan belajar ke jenjang berikutnya.

Saat ini kalian akan diajak kembali belajar tentang Fisika. Fisika merupakan salah satu cabang IPA yang mendasari perkembangan teknologi maju dan konsep hidup harmonis dengan alam.

Perkembangan pesat di bidang teknologi informasi dan komunikasi dewasa ini, sedikit banyak dipicu oleh temuan-temuan di bidang fisika material melalui penemuan piranti mikroelektronika yang mampu memuat banyak informasi dengan ukuran yang sangat kecil. Oleh karena itu, sebagai seorang pelajar kalian perlu memiliki kemampuan berpikir, bekerja, dan bersikap ilmiah serta berkomunikasi sebagai salah satu aspek penting kecakapan hidup di era globalisasi ini.

Buku ini ditulis untuk memenuhi kebutuhan kalian akan pengetahuan, pemahaman, dan sejumlah kemampuan yang dipersyaratkan untuk memasuki jenjang pendidikan yang lebih tinggi serta mengembangkan ilmu dan teknologi. Selain itu, juga untuk membantu kalian mengembangkan kemampuan bernalar, mengembangkan pengalaman, memupuk sikap ilmiah, dan membentuk sikap positif terhadap fisika. Buku ini memuat aspek materi fisika yang menekankan pada segala bentuk fenomena alam dan pengukurannya, gerak benda dengan berbagai hukumnya, penerapan gejala gelombang dalam berbagai bidang ilmu fisika, dan lain-lain yang disusun secara sistematis, komprehensif, dan terpadu. Dengan demikian, kalian akan memperoleh pemahaman yang lebih luas dan mendalam tentang aspek-aspek tersebut.

Akhirnya, semoga buku ini bermanfaat bagi kalian dalam memperoleh pengetahuan, pemahaman, dan kemampuan menganalisis segala hal yang berkaitan dengan fenomena alam sehingga kalian mampu hidup selaras berdasarkan hukum alam, mampu mengelola sumber daya alam dan lingkungan serta mampu mengurangi dampak bencana alam di sekitar kalian.

Selamat belajar, semoga sukses.

Juli, 2007

Penulis

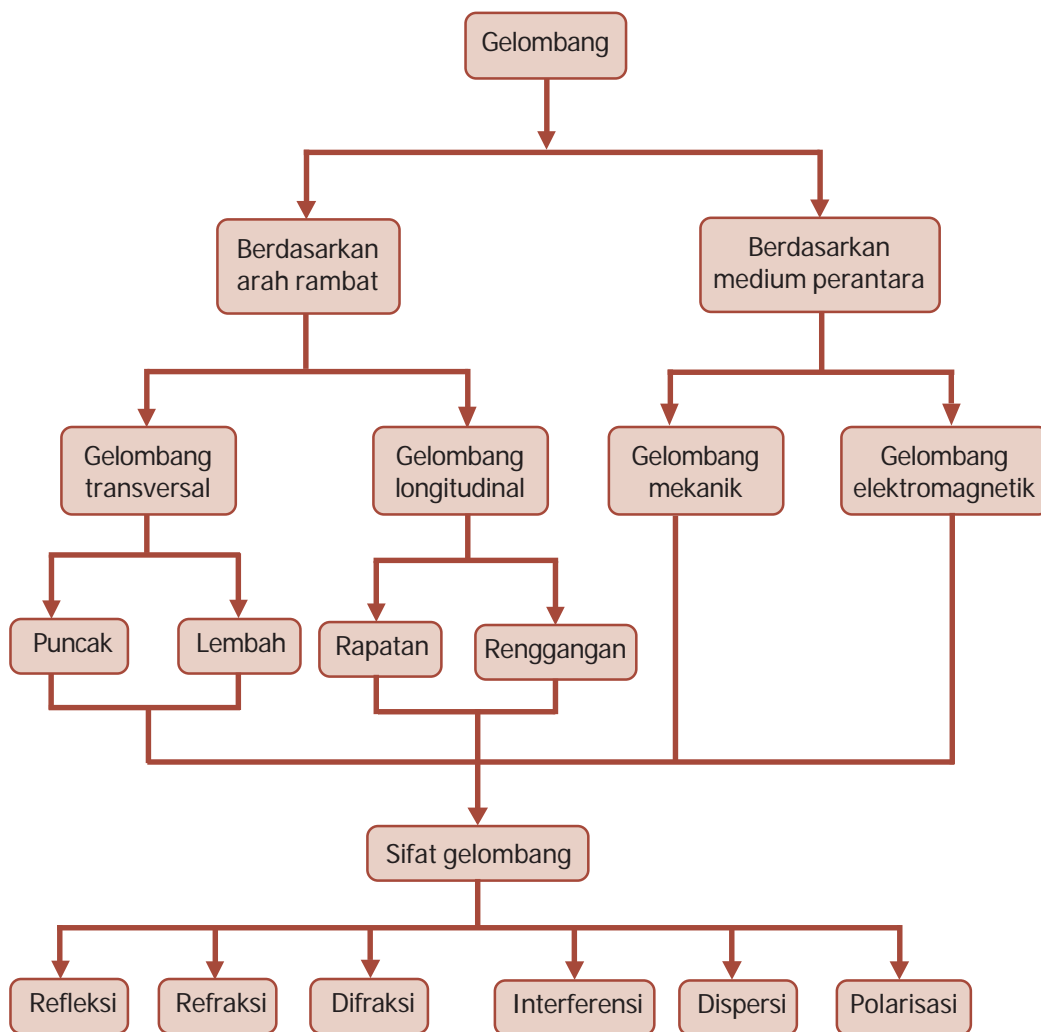
Daftar Isi

KATA SAMBUTAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
BAB 1 GELOMBANG	1
A. Pengertian Gelombang	2
B. Energi Gelombang	8
C. Superposisi	9
D. Gelombang Berjalan dan Gelombang Stasioner	10
E. Sifat-Sifat Gelombang	17
Kilas Balik	21
Uji Kompetensi	22
BAB 2 GELOMBANG CAHAYA	25
A. Teori Maxwell	26
B. Energi dalam Gelombang Elektromagnetik	27
C. Sifat-Sifat Gelombang Cahaya	33
D. Efek Doppler pada Gelombang Elektromagnetik	48
E. Aplikasi Gelombang Cahaya	48
Kilas Balik	51
Uji Kompetensi	53
BAB 3 GELOMBANG BUNYI	57
A. Bunyi merupakan Gelombang Longitudinal	58
B. Sifat Bunyi	59
C. Efek Doppler	60
D. Cepat Rambat Gelombang	62
E. Sumber Bunyi	65
F. Energi dan Intensitas Gelombang	69
G. Pelayangan Bunyi	71
H. Aplikasi Bunyi Ultrasonik	74
Kilas Balik	76
Uji Kompetensi	78
BAB 4 LISTRIK STATIS	81
A. Listrik Statis dan Muatan Listrik	82
B. Hukum Coulomb	83
C. Medan Listrik	86
D. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik	92
E. Kapasitor	97
Kilas Balik	106
Uji Kompetensi	107
BAB 5 MEDAN MAGNETIK	111
A. Medan Magnetik di Sekitar Arus Listrik	112
B. Gaya Magnetik (Gaya Lorentz)	120
C. Penerapan Gaya Magnetik	126
Kilas Balik	128

	Uji Kompetensi	129
BAB 6	INDUKSI ELEKTROMAGNETIK	133
	A. Ggl Induksi	134
	B. Aplikasi Induksi Elektromagnetik	141
	C. Induktansi	146
	Kilas Balik	152
	Uji Kompetensi	153
BAB 7	ARUS DAN TEGANGAN LISTRIK BOLAK-BALIK	156
	A. Rangkaian Arus Bolak-Balik	158
	B. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-Balik	170
	C. Resonansi pada Rangkaian Arus Bolak-Balik	172
	Kilas Balik	174
	Uji Kompetensi	174
	UJI KOMPETENSI SEMESTER 1	178
BAB 8	RADIASI BENDA HITAM	189
	A. Radiasi Panas dan Intensitas Radiasi	190
	B. Hukum Pergeseran Wien	193
	C. Hukum Radiasi Planck	194
	D. Efek Fotolistrik dan Efek Compton	197
	Kilas Balik	202
	Uji Kompetensi	203
BAB 9	FISIKA ATOM	207
	A. Teori Model Atom	208
	B. Tingkat Energi	214
	C. Bilangan Kuantum	217
	D. Asas Pauli	220
	E. Energi Ionisasi dan Afinitas Elektron	221
	Kilas Balik	224
	Uji Kompetensi	225
BAB 10	RELATIVITAS KHUSUS	229
	A. Relativitas Newton	230
	B. Percobaan Michelson dan Morley	232
	C. Postulat Teori Relativitas Khusus	233
	D. Massa, Momentum, dan Energi Relativistik	239
	E. Aplikasi Kesetaraan Massa dan Energi	242
	Kilas Balik	244
	Uji Kompetensi	245
BAB 11	FISIKA INTI DAN RADIOAKTIVITAS	249
	A. Partikel Penyusun Inti Atom	250
	B. Radioaktivitas	255
	C. Reaksi Inti	265
	D. Reaktor Nuklir	269
	Kilas Balik	271
	Uji Kompetensi	272
	UJI KOMPETENSI SEMESTER 2	275
	GLOSARIUM	287
	DAFTAR PUSTAKA	289
	DAFTAR KONSTANTA	291
	KUNCI JAWABAN	294
	INDEKS	296

PETA KONSEP

Bab 1 Gelombang



BAB

1

GELOMBANG



- Gempa bumi diakibatkan pergeseran kulit bumi yang membentuk pola gelombang.

Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Peristiwa gempa bumi yang sering terjadi di Indonesia merupakan peristiwa alam yang dahsyat. Gempa bumi terjadi akibat bergesernya lapisan kulit bumi. Pergeseran lapisan kulit bumi ini membentuk suatu pola gelombang. Secara umum, gelombang dibedakan menjadi gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik adalah gelombang yang dalam perambatannya memerlukan medium. Sementara itu, gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dalam perambatannya tidak memerlukan medium. Untuk lebih memahami konsep gelombang ikutilah uraian berikut ini.

Kata Kunci

amplitudo, difraksi, dispersi, fase gelombang, frekuensi, gelombang, interferensi

Sebuah bandul yang berayun mengalami gerak osilasi. Karakteristik gerak osilasi yang paling dikenal adalah bahwa gerak tersebut bersifat periodik atau berulang-ulang. Contoh osilasi yang dapat kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari antara lain bandul jam yang berayun ke kiri dan ke kanan atau getaran dawai pada alat musik. Apabila bandul berayun atau berosilasi ia memiliki energi dalam jumlah yang tetap, yang berubah-ubah antara energi potensial pada tiap-tiap ujung ayunannya dan energi gerak pada titik tengahnya. Kecepatan osilasi bandul merupakan frekuensinya. Benda berosilasi dapat membawa sebagian atau seluruh energinya ke objek lain dengan gerakan gelombang. Misalnya, apabila air dibuat berosilasi, energi osilasinya tersebar ke permukaan di sekitarnya dalam bentuk gelombang, karena tiap-tiap molekul air memengaruhi molekul di sekelilingnya. Pada kasus bunyi menyebar dengan cara serupa.

Pada bab ini, kalian akan mempelajari tentang gelombang secara umum, sifat-sifatnya, fase gelombang, gelombang berjalan, gelombang stasioner, pembiasan gelombang, difraksi gelombang, dan masih banyak lagi.



A. Pengertian Gelombang



Sumber: *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar*, PT Ichtiar Baru van Hoeve, 2005

Gambar 1.1 Gelombang laut.



Istilah "memecah" pada gelombang laut terjadi ketika seluruh gelombang berinteraksi dengan dasar perairan dangkal sehingga tidak lagi merupakan gelombang sederhana.

Konsep gelombang banyak diterapkan dalam kehidupan sehari-hari. Gelombang bunyi, gelombang cahaya, gelombang radio, dan gelombang air merupakan beberapa contoh bentuk gelombang. Ketika kita melihat fenomena gelombang laut, ternyata, air gelombang tidak bergerak maju, melainkan melingkar. Sehingga air hanya bergerak naik-turun begitu gelombang melintas. Tepi pantai menahan dasar gelombang, sehingga puncak gelombang bergerak lebih cepat untuk memecah di tepi pantai. Dengan demikian, terjadinya gerak gelombang laut dapat dirumuskan sebagai berikut. Pertama, air mencapai dasar lingkaran pada lembah gelombang. Kemudian, air mencapai bagian atas lingkaran pada puncak gelombang. Lalu, puncak gelombang memecah di tepi pantai. Gelombang air bergerak dengan kecepatan yang bisa diketahui. Tetapi, setiap partikel pada air itu sendiri, hanya berosilasi terhadap titik setimbang.

Gelombang bergerak melintasi jarak yang jauh, tetapi medium (cair, padat, atau gas) hanya bisa bergerak terbatas. Dengan demikian, walaupun gelombang bukan merupakan materi, pola gelombang dapat merambat pada materi.

Sebuah gelombang terdiri dari osilasi yang bergerak tanpa membawa materi bersamanya. Gelombang membawa energi dari satu tempat ke tempat lain. Pada kasus gelombang laut, energi diberikan ke gelombang air, misalnya oleh angin di laut lepas. Kemudian energi dibawa oleh gelombang ke pantai.

Gelombang periodik merupakan gerak gelombang secara teratur dan berulang-ulang yang mempunyai sumber berupa gangguan yang kontinu dan berosilasi, berupa getaran atau osilasi. Gelombang air bisa dihasilkan oleh benda penggetar apapun yang diletakkan di permukaan, seperti tangan, atau air itu sendiri dibuat bergetar ketika angin bertiup melintasinya, dan bisa juga karena sebuah batu yang dilempar ke dalamnya.

Komet
Kolom mengingat

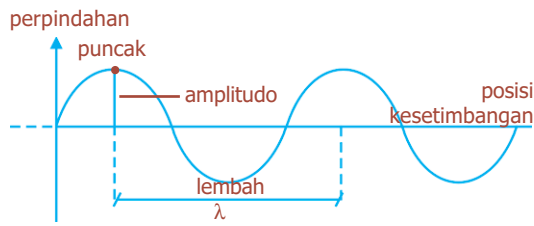
Gelombang adalah osilasi yang berpindah, tidak membawa materi bersamanya.

Percikan Fisika



Gelombang Laut

Gelombang laut dibedakan menjadi tiga macam, yaitu gelombang primer atau gelombang longitudinal. Gelombang ini merambat di permukaan bumi di dasar laut dengan kecepatan antara 7 - 14 km/sekon. Yang kedua adalah gelombang sekunder atau gelombang transversal. Gelombang ini merambat seperti gelombang primer melalui permukaan bumi di dasar laut. Dan yang ketiga adalah gelombang panjang. Gelombang ini dapat menyebabkan kerusakan di permukaan bumi karena berasal dari episentrum bumi. Gelombang panjang merambat dengan kecepatan 3 - 4 km/sekon di permukaan bumi. Gelombang ini dikategorikan sebagai gelombang laut tektonik karena diakibatkan oleh bergesernya lempengan kerak bumi.



Gambar 1.2 Karakteristik gelombang kontinu satu frekuensi.

1. Karakteristik Gelombang

Karakteristik utama suatu gelombang ditunjukkan oleh beberapa besaran yang penting, yang digunakan untuk mendeskripsikan gelombang sinusoida periodik, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.2.

Titik-titik tertinggi pada gelombang disebut **puncak gelombang**, sedangkan titik-titik terendah disebut **lembah gelombang**.

Amplitudo adalah perpindahan maksimum, yaitu ketinggian maksimum puncak, atau kedalaman maksimum lembah, relatif terhadap posisi kesetimbangan. Makin besar amplitudo, makin besar energi yang dibawa. Ayunan total dari puncak sampai ke lembah sama dengan dua kali amplitudo. Jarak dua titik berurutan pada posisi yang sama disebut **panjang gelombang** (λ). Panjang gelombang juga sama dengan jarak antardua puncak yang berurutan. Frekuensi (f), adalah jumlah puncak atau siklus lengkap yang melewati satu titik per satuan waktu. Sementara itu, periode (T), adalah waktu yang diperlukan untuk sekali osilasi, yaitu waktu yang berlalu antara dua puncak berurutan yang melewati titik yang sama pada ruang. Besar T adalah setara dengan $\frac{1}{f}$.

Jarak yang ditempuh gelombang dalam satuan waktu disebut *kecepatan gelombang* (v). Jika sebuah gelombang menempuh jarak satu panjang gelombang (λ), dalam satu periode (T), maka kecepatan gelombang adalah sama dengan λ / T , atau $v = \frac{\lambda}{T}$.

Karena $\frac{1}{T} = f$, maka:

$$v = \lambda \cdot f \dots\dots\dots (1.1)$$

Kecepatan gelombang bergantung pada sifat medium perambatannya. Misalnya, kecepatan gelombang pada tali bergantung pada tegangan tali (F_T), dan massa tali per satuan panjang (m/L).

Hubungan tersebut dapat dirumuskan:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{m/L}} \dots\dots\dots (1.2)$$

Dari persamaan (1.2), apabila besar massa per satuan panjang semakin besar, maka makin besar inersia yang dimiliki tali, sehingga perambatan gelombang akan lambat.

Komet
Kolom mengingat

Kecepatan gelombang tidak sama dengan kecepatan partikel.

2. Gelombang Transversal dan Gelombang Longitudinal

Pada gelombang yang merambat di atas permukaan air, air bergerak naik dan turun pada saat gelombang merambat, tetapi partikel air pada umumnya tidak bergerak maju bersama dengan gelombang. Gelombang seperti ini disebut **gelombang transversal**, karena gangguannya tegak lurus terhadap arah rambat, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.4. Gelombang elektromagnetik termasuk jenis gelombang ini, karena medan listrik dan medan magnet berubah secara periodik dengan arah tegak lurus satu sama lain. Dan juga tegak lurus terhadap arah rambat.

Pada gelombang bunyi, udara secara bergantian mengalami perapatan dan perenggangan karena adanya pergeseran pada arah gerak. Gelombang seperti ini disebut **gelombang longitudinal**.

Rapatan adalah daerah sepanjang gelombang longitudinal yang memiliki tekanan dan kerapatan molekul-molekulnya lebih tinggi dibandingkan saat tidak ada gelombang yang melewati daerah tersebut. Sementara itu, daerah dengan tekanan dan kerapatan molekul-molekulnya lebih rendah dibandingkan saat tidak ada gelombang yang melewatinya disebut **renggangan**. Gelombang longitudinal ini ditunjukkan oleh Gambar 1.5.



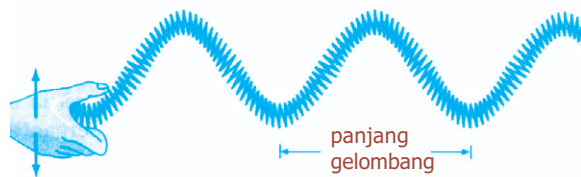
Gambar 1.5 Gelombang longitudinal pada slinki.

Semua gelombang memindahkan energinya tidak secara permanen melainkan melalui medium perambatan gelombang tersebut. Gelombang disebut juga dengan gelombang berjalan atau gelombang merambat disebabkan adanya perpindahan energi dari satu tempat ke tempat lain karena getaran. Pada gelombang transversal, misalnya gelombang tali, seperti yang ditunjukkan Gambar 1.6, memperlihatkan gelombang merambat ke kanan sepanjang tali. Tiap partikel tali berosilasi bolak-balik pada permukaan meja.



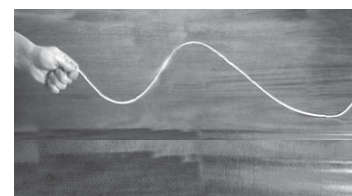
Sumber: *Jendela Iptek Energi*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 1.3 Gelombang air merupakan contoh gelombang transversal.



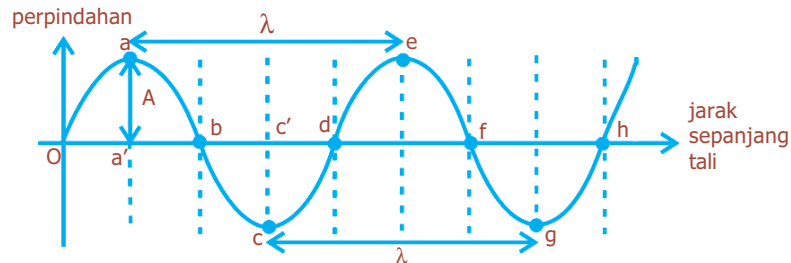
Sumber: *Fisika Jilid 1*, Erlangga, 2001

Gambar 1.4 Gelombang transversal.



Gambar 1.6 Gelombang yang merambat pada tali.

Tangan yang berosilasi memindahkan energi ke tali, yang kemudian membawanya sepanjang tali dan dipindahkan ke ujung lain. Grafik perpindahan gelombang tali tersebut dapat diamati pada Gambar 1.7.



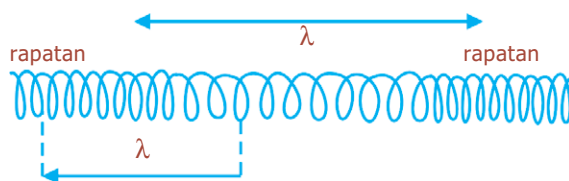
Gambar 1.7 Grafik simpangan terhadap kedudukan.

BETA^B Berita Fisika

Gelombang sering digambarkan sebagai runtu amplitudo terhadap waktu. Makin besar frekuensi, makin banyak osilasi yang terjadi setiap detik, dan makin pendek pula panjang gelombangnya.

Berikut ini dijelaskan beberapa istilah yang berlaku pada gelombang transversal, berdasarkan pada Gambar 1.7.

1. Puncak gelombang, yaitu titik-titik tertinggi pada gelombang (misalnya titik a dan e).
2. Dasar gelombang, yaitu titik-titik terendah pada gelombang (misalnya titik c dan g).
3. Bukit gelombang, yaitu lengkungan o-a-b atau d-e-f.
4. Lembah gelombang, yaitu lengkungan b-c-d atau f-g-h.
5. Amplitudo (A), yaitu perpindahan maksimum (misalnya: a'a dan c'c).
6. Panjang gelombang (λ), yaitu jarak antara dua puncak berurutan (misalnya a-e) atau jarak dua dasar berurutan (c-g).
7. Periode (T) yaitu waktu yang diperlukan untuk menempuh a-e atau c-g.



Gambar 1.8 Panjang gelombang pada gelombang longitudinal.

Panjang gelombang, frekuensi, dan kecepatan gelombang merupakan besaran-besaran yang berlaku dalam gelombang longitudinal. Panjang gelombang menunjukkan jarak antara rapatan yang berurutan atau renggangan yang berurutan. Sementara itu, frekuensi adalah jumlah tekanan yang melewati satu titik tertentu per sekon. Kecepatan

dimana setiap rapatan tampak bergerak menyatakan kecepatan gelombang, yang mempunyai bentuk hampir sama dengan kecepatan gelombang transversal pada tali pada persamaan (1.2), yaitu:

$$v = \sqrt{\frac{\text{faktor gaya elastis}}{\text{faktor inersia}}}$$

Untuk perambatan gelombang longitudinal pada batang padat, berlaku:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (1.3)$$

dengan E adalah modulus elastis materi, dan ρ adalah kerapatannya. Sementara itu, untuk perambatan gelombang longitudinal dalam zat cair atau gas adalah:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \dots\dots\dots (1.4)$$

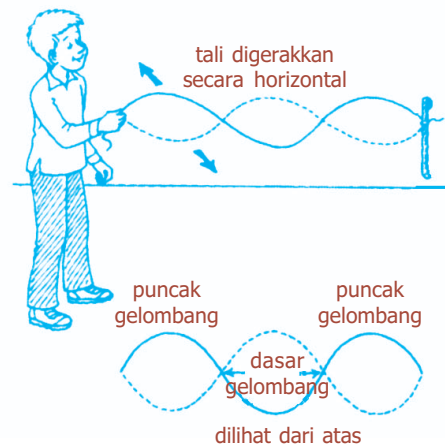
dengan B menyatakan **Modulus Bulk**.

Kegiatan

Tujuan : Menghasilkan gelombang yang berdiri.
Alat dan bahan : Tali sepanjang 6 kaki (1,8 m).

Cara Kerja:

1. Ikatlah salah satu ujung tali pada suatu penopang (ujung tetap). Buatlah agar tali bebas bergerak.
2. Pegang ujung tali yang tidak diikat (ujung bebas), kemudian menjauhlah hingga jarak tertentu dari ujung tetap sehingga tali menjadi lurus.
3. Menghadaplah ke ujung tetap. Dengan pelan, gerakkan tali bolak-balik ke kanan dan ke kiri untuk menghasilkan gelombang tali.



Lanjutkan gerakan ini secara konstan selama 6 kali atau lebih sehingga dihasilkan sejumlah gelombang yang sama. Perhatikan jumlah gelombang yang dihasilkan.

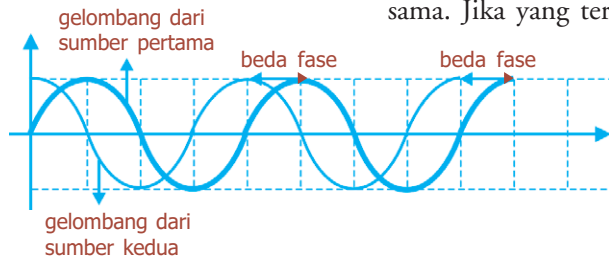
4. Gerakkan tali lebih cepat, kemudian perhatikan jumlah gelombang yang dihasilkan.

Diskusi:

1. Bagaimana arah gerak gelombang tali yang terbentuk?
2. Kesimpulan apa yang dapat kalian ambil dari kegiatan tersebut?

3. Fase Gelombang

Penjelasan mengenai suatu tahap yang telah dicapai oleh suatu gerak berkala, biasanya dengan membandingkan dengan gerak lain yang sejenis dengan frekuensi sama disebut **fase**. Dua gelombang dikatakan sefase, bila keduanya berfrekuensi sama dan titik-titik yang bersesuaian berada pada tempat yang sama selama osilasi (misalnya, keduanya berada pada puncak) pada saat yang sama. Jika yang terjadi sebaliknya, keduanya tidak sefase.



Gambar 1.9 Beda fase dua gelombang.

Dan dua gelombang berlawanan fase jika perpindahan keduanya tepat berlawanan arah (misalnya, puncak dan lembah).

Beda fase antara dua gelombang menyatakan ukuran seberapa jauh, diukur dalam sudut, sebuah titik pada salah satu gelombang berada

di depan atau di belakang titik yang bersesuaian dari gelombang lainnya. Untuk gelombang-gelombang yang berlawanan fase, beda fasenya adalah 180° ; untuk yang sefase, besarnya 0° .



B. Energi Gelombang

Gelombang dalam perambatannya membawa sejumlah energi dari satu tempat ke tempat lain. Energi dipindahkan sebagai energi getaran antarpartikel medium perambatan. Untuk gelombang sinusoida dengan frekuensi f , partikel bergerak dalam gerak harmonis sederhana, sehingga energi yang dimiliki tiap partikel adalah:

$$E = \frac{1}{2} k A^2 \dots\dots\dots (1.5)$$

Dengan A menyatakan amplitudo geraknya, baik secara transversal maupun longitudinal. Diketahui bahwa menurut persamaan frekuensi gelombang, $k = 4 \pi^2 m / T^2$ atau setara dengan $4 \pi^2 m f^2$, sehingga dari persamaan (1.5), diperoleh:

$$E = 2 \pi^2 m f^2 A^2 \dots\dots\dots (1.6)$$

Dengan m adalah massa partikel pada medium, yang merupakan hasil kali massa jenis medium dengan volumenya.

Komet
Kolom mengingat

Pada transmisi energi oleh gelombang, daya yang ditransmisikan berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo, kuadrat frekuensi, dan laju gelombang.

$$P = 2 \pi^2 \rho S v f^2 A^2$$

Dari Gambar 1.10, dapat ditentukan bahwa volume $V = Sl$, di mana S adalah luas permukaan melalui mana gelombang merambat, dan l adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam selang waktu t , sehingga $l = vt$, dengan v menyatakan laju gelombang. Sehingga diperoleh:
 $m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot l = \rho \cdot S \cdot v \cdot t$, maka:

$$E = 2\pi^2 \rho S v f^2 A^2 \dots\dots\dots (1.7)$$

Dari persamaan (1.7) terlihat bahwa energi yang dibawa gelombang sebanding dengan kuadrat amplitudo. Energi yang dipindahkan gelombang biasanya dinyatakan dalam intensitas gelombang. **Intensitas gelombang** (I) didefinisikan sebagai daya gelombang yang dibawa melalui bidang seluas satu satuan yang tegak lurus terhadap aliran energi. Sehingga, intensitas gelombang dapat dinyatakan sebagai berikut:

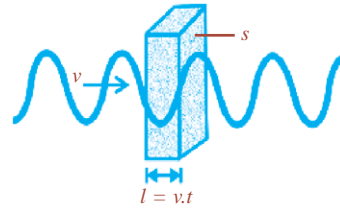
$$I = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (1.8)$$

Dengan P adalah daya yang dibawa, yang besarnya adalah:

$$P = \frac{E}{t} = 2\pi^2 \rho S v f^2 A^2 \dots\dots\dots (1.9)$$

Sehingga, intensitas gelombang pada persamaan (1.8) adalah:

$$I = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2 \dots\dots\dots (1.10)$$



Gambar 1.10 Perambatan gelombang pada medium bervolume $S \cdot l$.



C. Superposisi

Berdasarkan eksperimen bahwa dua atau lebih gelombang dapat melintasi ruang yang sama, tanpa adanya ketergantungan di antara gelombang-gelombang tersebut terhadap satu sama lain. Jika dua gelombang atau lebih merambat dalam medium yang sama dan pada waktu yang sama, akan menyebabkan simpangan dari partikel dalam medium. Simpangan resultan merupakan jumlah aljabar dari simpangan (positif dan negatif) dari masing-masing gelombang. Hal ini disebut **prinsip superposisi**.

Pada superposisi dua gelombang atau lebih akan menghasilkan sebuah gelombang berdiri. Simpangan yang dihasilkan bisa saling menguatkan atau saling melemahkan, tergantung pada beda fase gelombang-gelombang tersebut.

Komet

Kolom mengingat

Prinsip superposisi menyatakan sifat gerakan gelombang bahwa gelombang resultan merupakan penjumlahan dua atau lebih gelombang individual. Prinsip superposisi hanya berlaku untuk pulsa-pulsa gelombang kecil yang tinggi pulsanya lebih kecil dibandingkan panjangnya.

Jika beda fase antara gelombang-gelombang yang mengalami superposisi adalah $\frac{1}{2}$, maka hasilnya saling melemahkan. Apabila panjang gelombang dan amplitudo gelombang-gelombang tersebut sama, maka simpangan hasil superposisinya nol. Tetapi, apabila gelombang-gelombang yang mengalami superposisi berfase sama, maka simpangan hasil superposisi itu saling menguatkan. Jika panjang gelombang dan amplitudo gelombang-gelombang itu sama, maka simpangan resultan adalah sebuah gelombang berdiri dengan amplitudo kedua gelombang.



D. Gelombang Berjalan dan Gelombang Stasioner

1. Gelombang Berjalan

Pada sebuah tali yang panjang diregangkan di dalam arah x di mana sebuah gelombang transversal sedang berjalan. Pada saat $t = 0$, bentuk tali dinyatakan:

$$y = f(x) \dots\dots\dots (1.11)$$

dengan y adalah pergeseran transversal tali pada kedudukan x . Bentuk gelombang tali yang mungkin pada $t = 0$ ditunjukkan pada Gambar 1.11(a). Pada waktu t gelombang tersebut berjalan sejauh vt ke kanan, dengan v menunjukkan besarnya kecepatan gelombang, yang dianggap konstan. Maka persamaan kurva pada waktu t adalah:

$$y = f(x - vt) \dots\dots\dots (1.12)$$

Persamaan (1.12) adalah persamaan umum yang menyatakan sebuah gelombang yang berjalan ke kanan, di mana x akan semakin besar dengan bertambahnya waktu, dan secara grafis ditunjukkan pada Gambar 1.11(b). Apabila kita ingin menyatakan sebuah gelombang yang berjalan ke kiri, maka:

$$y = f(x + vt) \dots\dots\dots (1.13)$$

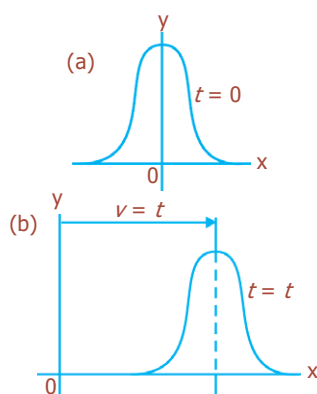
Untuk sebuah fase khas dari sebuah gelombang yang berjalan ke kanan berlaku:

$$x - vt = \text{konstan}$$

Maka dari diferensiasi terhadap waktu akan diperoleh:

$$\frac{dx}{dt} - v = 0 \text{ atau } \frac{dx}{dt} = v \dots\dots\dots (1.14)$$

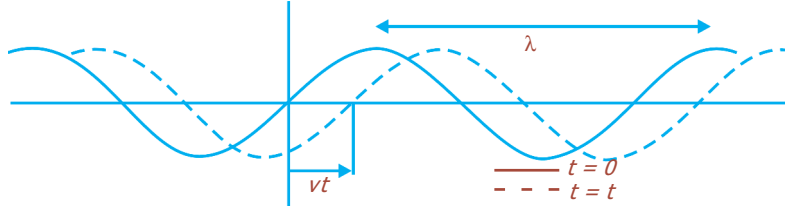
Dengan v adalah kecepatan fase gelombang. Untuk gelombang yang berjalan ke kiri kita memperoleh kecepatan fase gelombang adalah $-v$.



Gambar 1.11 Bentuk sebuah tali yang diregangkan (a) pada $t = 0$, (b) pada $x = vt$.

Persamaan gelombang tali pada waktu $t = 0$ dinyatakan:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \dots\dots\dots (1.15)$$



Gambar 1.12 Kurva sinus pada gelombang tali.

Bentuk gelombang tersebut adalah sebuah kurva sinus, ditunjukkan pada Gambar 1.12. Pergeseran maksimum, A , adalah amplitudo kurva sinus tersebut. Nilai pergeseran transversal y adalah sama di x seperti di $x + \lambda$, $x + 2\lambda$, dan sebagainya. Panjang gelombang λ menyatakan jarak di antara dua titik yang berdekatan di dalam gelombang tersebut yang berfase sama. Jika gelombang tersebut bergerak ke kanan dengan kecepatan fase v , maka persamaan gelombang tersebut pada waktu t adalah:

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \dots\dots\dots (1.16)$$

Waktu yang diperlukan gelombang untuk menempuh satu panjang gelombang (λ) disebut periode (T), sehingga:

$$\lambda = v \cdot T \dots\dots\dots (1.17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (1.17) ke persamaan (1.15), maka akan diperoleh:

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \dots\dots\dots (1.18)$$

Pada konsep gelombang berlaku suatu *bilangan gelombang* (*wave number*), k dan frekuensi sudut (ω), yang dinyatakan:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ dan } \omega = \frac{2\pi}{T} \dots\dots\dots (1.19)$$

Sehingga, dari persamaan (1.18) akan diperoleh:

$$y = A \sin (kx - \omega t) \dots\dots\dots (1.20)$$

Persamaan tersebut berlaku untuk gelombang sinus yang berjalan ke kanan (arah x positif). Sementara itu, untuk arah x negatif berlaku:

$$y = A \sin (kx + \omega t) \dots\dots\dots (1.21)$$

Dari persamaan (1.17) dan persamaan (1.19), akan diperoleh nilai kecepatan fase (v) dari gelombang adalah:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \dots\dots\dots (1.22)$$

Persamaan (1.20) dan (1.21) menunjukkan pergeseran y adalah nol pada kedudukan $x = 0$ dan $t = 0$. Pernyataan umum sebuah deret gelombang sinusoida yang berjalan ke kanan adalah:

$$y = A \sin(kx - \omega t - \phi) \dots\dots\dots (1.23)$$

Dengan ϕ adalah konstanta fase. Jika $\phi = -90^\circ$, maka pergeseran y di $x = 0$ dan $t = 0$ adalah y_m , yang dinyatakan:

$$y = A \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (1.24)$$

Hal ini disebabkan fungsi cosinus digeser 90° dari fungsi sinus. Jika sebuah titik pada tali berlaku $x = \pi/k$, maka pergeseran di titik tersebut adalah:

$$y = A \sin(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (1.25)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa setiap elemen khas dari tali tersebut mengalami gerak harmonis sederhana di sekitar kedudukan kesetimbangannya pada waktu gelombang berjalan sepanjang tali tersebut.

Contoh Soal

Persamaan gelombang berjalan pada seutas tali dinyatakan dengan $y = 0,02 \sin(20\pi t - 0,2\pi x)$. Jika x dan y dalam cm dan t dalam sekon, tentukan:

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| a. amplitudo, | d. bilangan gelombang, dan |
| b. panjang gelombang, | e. frekuensi gelombang! |
| c. kelajuan perambatan, | |

Penyelesaian:

Persamaan umum gelombang y , seperti yang diperlihatkan pada persamaan (1.20) adalah:

$$y = y_m \sin(kx - \omega t)$$

$$y = -y_m \sin(\omega t - kx)$$

diberikan:

$$y = \underbrace{0,02}_A \sin(\underbrace{20\pi}_\omega t - \underbrace{0,2\pi}_k x)$$

Jadi,

a. Amplitudo, $A = 0,02$ cm

b. Panjang gelombang (λ),

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{0,2\pi} = 10 \text{ cm}$$

c. Kelajuan perambatan (v)

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{20\pi}{0,2\pi} = 100 \text{ cm/s}$$

d. Bilangan gelombang (k),

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{10} = 0,2\pi$$

e. Frekuensi (f),

$$\omega = 2\pi f$$

$$20\pi = 2\pi f$$

$$f = \frac{20\pi}{2\pi} = 10 \text{ Hz}$$

Uji Kemampuan 1.1

1. Sebuah gelombang berjalan pada seutas kawat dinyatakan oleh persamaan:

$$y = 2,0 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{0,20} + \frac{\lambda}{60} \right) \right], \text{ dengan } x \text{ dan } y \text{ dalam cm dan } t \text{ dalam sekon.}$$

Tentukan:

- arah perambatan gelombang,
- amplitudo dan frekuensi gelombang,
- panjang gelombang dan cepat rambat gelombang!

2. Suatu gelombang transversal merambat sepanjang seutas kawat yang dinyatakan dalam persamaan:

$$y = 3 \text{ mm} \sin[(18 \text{ m}^{-1})x - (400 \text{ s}^{-1})t]$$

Tentukan cepat rambat gelombang tersebut!

2. Gelombang Stasioner

Gelombang stasioner disebut juga *gelombang berdiri* atau *gelombang tegak*, merupakan jenis gelombang yang bentuk gelombangnya tidak bergerak melalui medium, namun tetap diam. Gelombang ini berlawanan dengan gelombang berjalan atau gelombang merambat, yang bentuk gelombangnya bergerak melalui medium dengan kelajuan gelombang. Gelombang diam dihasilkan bila suatu gelombang berjalan dipantulkan kembali sepanjang lintasanya sendiri.

Pada dua deret gelombang dengan frekuensi sama, memiliki kelajuan dan amplitudo yang sama, berjalan di dalam arah-arrah yang berlawanan sepanjang sebuah tali, maka persamaan untuk menyatakan dua gelombang tersebut adalah:

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2 = A \sin(kx + \omega t)$$

Komet

Kolom mengingat

Gelombang stasioner terjadi karena interferensi antara gelombang datang dengan gelombang pantul. Gelombang datang dan gelombang terpantul pada gelombang stasioner ini mempunyai panjang gelombang, amplitudo, dan fase sama, tetapi berlawanan arah.

Resultan kedua persamaan tersebut adalah:

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) \dots\dots (1.26)$$

Dengan menggunakan hubungan trigonometrik, resultannya menjadi:

$$y = 2A \sin kx \cos \omega t \dots\dots\dots (1.27)$$

Persamaan (1.27) adalah persamaan sebuah gelombang tegak (*standing wave*). Ciri sebuah gelombang tegak adalah kenyataan bahwa amplitudo tidaklah sama untuk partikel-partikel yang berbeda-beda tetapi berubah dengan kedudukan x dari partikel tersebut. Amplitudo (persamaan (1.27)) adalah $2 y_m \sin kx$, yang memiliki nilai maksimum $2 y_m$ di kedudukan-kedudukan di mana:

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \text{ dan seterusnya}$$

$$\text{atau } x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \text{ dan seterusnya}$$

Titik tersebut disebut *titik perut*, yaitu titik-titik dengan pergeseran maksimum. Sementara itu, nilai minimum amplitudo sebesar nol di kedudukan-kedudukan di mana:

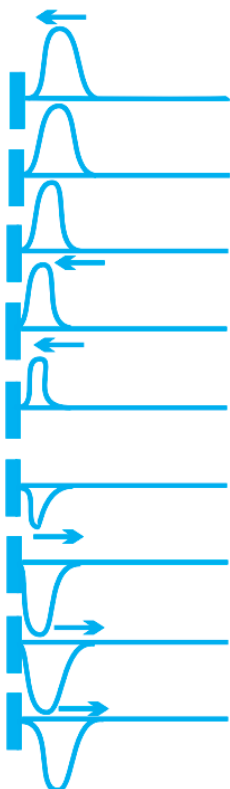
$$kx = \pi, 2\pi, 3\pi, \text{ dan seterusnya}$$

$$\text{atau } x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, 2\lambda, \text{ dan seterusnya}$$

Titik-titik tersebut disebut *titik simpul*, yaitu titik-titik yang pergeserannya nol. Jarak antara satu titik simpul dan titik perut berikutnya yaitu seperempat panjang gelombang.

a. Gelombang Stasioner pada Tali dengan Ujung Tetap

Gambar 1.13 menunjukkan refleksi sebuah pulsa gelombang pada tali dengan ujung tetap. Ketika sebuah pulsa sampai di ujung, maka pulsa tersebut mengarahkan semua gaya yang arahnya ke atas pada penopang, maka penopang memberikan gaya yang sama tapi berlawanan arahnya pada tali tersebut (menurut Hukum III Newton). Gaya reaksi ini menghasilkan sebuah pulsa di penopang, yang berjalan kembali sepanjang tali dengan arah berlawanan dengan arah pulsa masuk. Dapat dikatakan bahwa pulsa masuk direfleksikan di titik ujung tetap tali, di mana pulsa direfleksikan kembali dengan arah pergeseran transversal yang dibalik. Pergeseran di setiap titik merupakan jumlah pergeseran yang disebabkan oleh gelombang masuk dan gelombang yang direfleksikan.



Gambar 1.13 Refleksi sebuah pulsa di ujung tetap sebuah tali.

Karena titik ujung tetap, maka kedua gelombang harus berinterferensi secara destruktif di titik tersebut sehingga akan memberikan pergeseran sebesar nol di titik tersebut. Maka, gelombang yang direfleksikan selalu memiliki beda fase 180° dengan gelombang masuk di batas yang tetap. Dapat disimpulkan, bahwa ketika terjadi refleksi di sebuah ujung tetap, maka sebuah gelombang mengalami perubahan fase sebesar 180° . Hasil superposisi gelombang datang (y_1), dan gelombang pantul (y_2), pada ujung tetap, berdasarkan persamaan (1.27) adalah:

$$y = 2A \sin kx \cos \omega t$$

$$y = A_p \cos \omega t \dots\dots\dots (1.28)$$

$$A_p = 2A \sin kx \dots\dots\dots (1.29)$$

b. Gelombang Stasioner pada Tali dengan Ujung Bebas

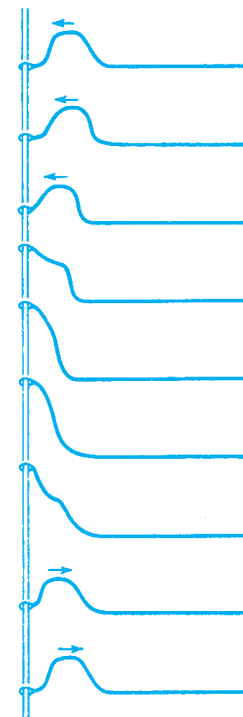
Refleksi sebuah pulsa di ujung bebas pada sebuah tali yang diregangkan terlihat pada Gambar 1.14. Pada saat pulsa tiba di ujung bebas, maka pulsa memberikan gaya pada elemen tali tersebut. Elemen ini dipercepat dan inersianya mengangkut gaya tersebut melewati titik kesetimbangan. Di sisi lain, gaya itu juga memberikan sebuah gaya reaksi pada tali. Gaya reaksi ini menghasilkan sebuah pulsa yang berjalan kembali sepanjang tali dengan arah berlawanan dengan arah pulsa yang masuk. Dalam hal ini refleksi yang terjadi adalah di sebuah ujung bebas. Pergeseran maksimum partikel-partikel tali akan terjadi pada ujung bebas tersebut, di mana gelombang yang masuk dan gelombang yang direfleksikan harus berinterferensi secara konstruktif. Maka, gelombang yang direfleksikan tersebut selalu sefase dengan gelombang yang masuk di titik tersebut. Dapat dikatakan, bahwa pada sebuah ujung bebas, maka sebuah gelombang direfleksikan tanpa perubahan fase.

Jadi, sebuah gelombang tegak yang terjadi di dalam sebuah tali, maka akan terdapat titik simpul di ujung tetap, dan titik perut di ujung bebas. Hasil superposisi gelombang datang dan gelombang pantul pada ujung bebas adalah:

$$y = y_1 + y_2$$

dengan:

$$y_1 = A \sin (kx - \omega t) \text{ dan } y_2 = -A \sin (kx + \omega t)$$



Gambar 1.14 Refleksi sebuah pulsa di ujung bebas sebuah tali yang diregangkan.

maka:

$$y = [A \sin(kx - \omega t) - \sin(kx + \omega t)]$$

$$y = 2A \cos kx \sin \omega t \dots\dots\dots (1.30)$$

$$y = A_p \sin \omega t \dots\dots\dots (1.31)$$

$$A_p = 2A \cos kx \dots\dots\dots (1.32)$$

Contoh Soal

Seutas tali panjangnya 80 cm direntangkan horizontal. Salah satu ujungnya digetarkan harmonik naik-turun dengan frekuensi $\frac{1}{4}$ Hz dan amplitudo 12 cm, sedang ujung lainnya terikat. Getaran harmonik tersebut merambat ke kanan sepanjang kawat dengan cepat rambat 3 cm/s. Tentukan amplitudo gelombang hasil interferensi di titik yang berjarak 53 cm dari titik asal getaran!

Penyelesaian:

Diketahui: $l = 80$ cm

$$f = \frac{1}{4} \text{ Hz}$$

$$A = 12 \text{ cm}$$

$$v = 3 \text{ cm/s}$$

$$x = (80 - 53) \text{ cm} = 27 \text{ cm}$$

Untuk menentukan amplitudo gelombang stasioner A_s dengan persamaan:

$$A_s = 2A \sin kx$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{v}{f} \\ &= \frac{3}{1/4} \\ &= 12 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= \frac{2\pi}{\lambda} \\ &= \frac{2\pi}{12} \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s &= 2(12) \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right)(27) \\ &= 24 \sin 4,5\pi = 24 \times 1 = 24 \text{ cm} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 1.2

Seutas kawat dengan panjang 120 cm direntangkan horizontal. Salah satu ujungnya digetarkan harmonik dengan gerakan naik-turun dengan frekuensi $\frac{1}{4}$ Hz, dan amplitudo 12 cm, sedangkan ujung lainnya terikat. Getaran harmonik tersebut merambat ke kanan dengan cepat rambat 4 cm/s. Jika interferensi terjadi pada 66 cm dari sumber getar, berapakah amplitudo gelombang tersebut?



E. Sifat-sifat Gelombang

1. Pemantulan

Pemantulan (refleksi) adalah peristiwa pengembalian seluruh atau sebagian dari suatu berkas partikel atau gelombang bila berkas tersebut bertemu dengan bidang batas antara dua medium.

Suatu garis atau permukaan dalam medium dua atau tiga dimensi yang dilewati gelombang disebut **muka gelombang**. Muka gelombang ini merupakan tempat kedudukan titik-titik yang mengalami gangguan dengan fase yang sama, biasanya tegak lurus arah gelombang dan dapat mempunyai bentuk, misalnya muka gelombang melingkar dan muka gelombang lurus, seperti yang terlihat pada Gambar 1.15. Pada jarak yang sangat jauh dari suatu sumber dalam medium yang seragam, muka gelombang merupakan bagian-bagian kecil dari bola dengan jari-jari yang sangat besar, sehingga dapat dianggap sebagai bidang datar. Misalnya, muka gelombang sinar matahari, yang tiba di Bumi merupakan bidang datar.

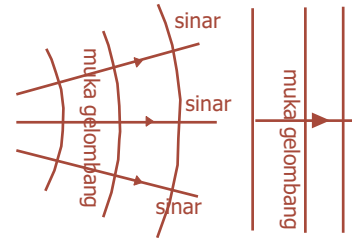
Pada peristiwa pemantulan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.16, berlaku suatu hukum yang berbunyi:

- sinar datang, sinar pantul, dan garis normal terhadap bidang batas pemantul pada titik jatuh, semuanya berada dalam satu bidang,
- sudut datang (θ_i) sama dengan sudut pantul (θ_r). Hukum tersebut dinamakan “Hukum Pemantulan”.

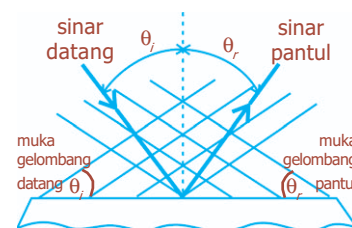
2. Pembiasan (Refraksi)

Perubahan arah gelombang saat gelombang masuk ke medium baru yang mengakibatkan gelombang bergerak dengan kelajuan yang berbeda disebut **pembiasan**. Pada pembiasan terjadi perubahan laju perambatan. Panjang gelombangnya bertambah atau berkurang sesuai dengan perubahan kelajuannya, tetapi tidak ada perubahan frekuensi. Peristiwa ini ditunjukkan pada Gambar 1.17.

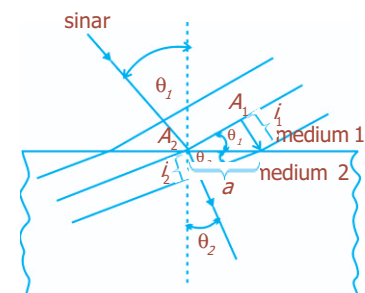
Pada gambar tersebut kecepatan gelombang pada medium 2 lebih kecil daripada medium 1. Dalam hal ini, arah gelombang membelok sehingga perambatannya lebih hampir tegak lurus terhadap batas. Jadi, sudut pembiasan (θ_2), lebih kecil daripada sudut datang (θ_1).



Gambar 1.15 Muka gelombang: (a) gelombang melingkar, (b) gelombang datar.



Gambar 1.16 Pemantulan gelombang oleh bidang.



Gambar 1.17 Pembiasan Gelombang.

Hukum Snellius dikemukakan oleh Willbrord van Roijen Snell (1580 - 1626) seorang astronom dan ahli matematika dari Belanda.

Gelombang yang datang dari medium 1 ke medium 2 mengalami perlambatan. Muka gelombang A , pada waktu yang sama t di mana A_1 merambat sejauh $l_1 = v_1 t$, terlihat bahwa A_2 merambat sejauh $l_2 = v_2 t$. Kedua segitiga yang digambarkan memiliki sisi sama yaitu a . Sehingga:

$$\sin \theta_1 = \frac{l_1}{a} = \frac{v_1 t}{a} \text{ dan } \sin \theta_2 = \frac{l_2}{a} = \frac{v_2 t}{a},$$

Dari kedua persamaan tersebut diperoleh:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \dots\dots\dots (1.33)$$

Perbandingan v_1/v_2 menyatakan indeks bias relatif medium 2 terhadap medium 1, n , sehingga:

$$n = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (1.34)$$

Dari persamaan (1.33) dan (1.34) akan diperoleh:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (1.35)$$

atau

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \dots\dots\dots (1.36)$$

Persamaan (1.36) merupakan pernyataan *Hukum Snellius*.

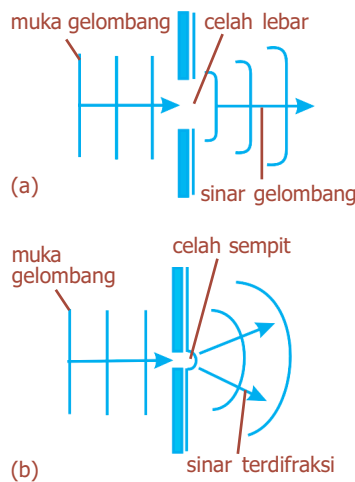
3. Difraksi

Difraksi merupakan peristiwa penyebaran atau pembelokan gelombang pada saat gelombang tersebut melintas melalui bukaan atau mengelilingi ujung penghalang. Besarnya difraksi bergantung pada ukuran penghalang dan panjang gelombang, seperti pada Gambar 1.18. Makin kecil panghalang dibandingkan panjang gelombang dari gelombang itu, makin besar pembelokannya.

4. Interferensi

Interaksi antara dua gerakan gelombang atau lebih yang memengaruhi suatu bagian medium yang sama sehingga gangguan sesaat pada gelombang paduan merupakan jumlah vektor gangguan-gangguan sesaat pada masing-masing gelombang merupakan penjelasan fenomena interferensi. Interferensi terjadi pada dua gelombang koheren, yaitu gelombang yang memiliki frekuensi dan beda fase sama.

Pada gelombang tali, jika dua buah gelombang tali merambat berlawanan arah, saat bertemu keduanya melakukan interferensi. Setelah itu, masing-masing melanjutkan



Gambar 1.18 Difraksi gelombang: (a) pada celah lebar, (b) pada celah sempit.

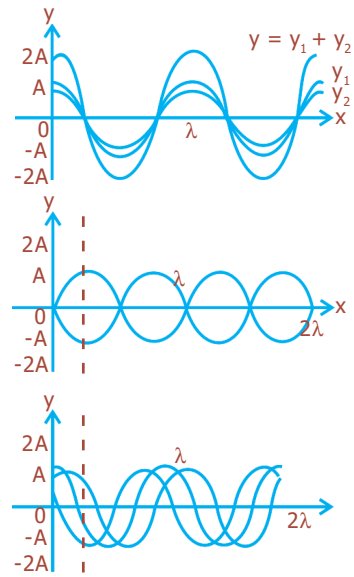
perjalanannya seperti semula tanpa terpengaruh sedikit pun dengan peristiwa interferensi yang baru dialaminya. Sifat khas ini hanya dimiliki oleh gelombang.

Jika dua buah gelombang bergabung sedemikian rupa sehingga puncaknya tiba pada satu titik secara bersamaan, amplitudo gelombang hasil gabungannya lebih besar dari gelombang semula. Gabungan gelombang ini disebut **saling menguatkan (konstruktif)**. Titik yang mengalami interferensi seperti ini disebut perut gelombang. Akan tetapi, jika puncak gelombang yang satu tiba pada suatu titik bersamaan dengan dasar gelombang lain, amplitudo gabungannya minimum (sama dengan nol). Interferensi seperti ini disebut interferensi **saling melemahkan (destruktif)**. Interferensi pada gelombang air dapat diamati dengan menggunakan tangki riak dengan dua pembangkit gelombang lingkaran.

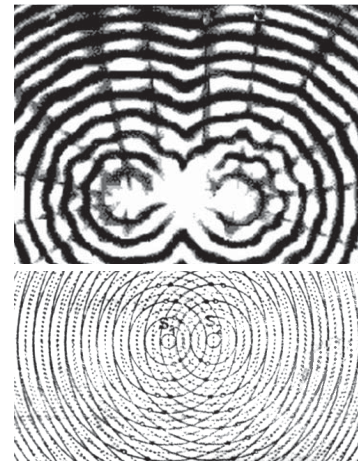
Analisis interferensi gelombang air digunakan seperti pada Gambar 1.20. Berdasarkan gambar, S_1 dan S_2 merupakan sumber gelombang lingkaran yang berinterferensi. Garis tebal (tidak putus-putus) menunjukkan muka gelombang yang terdiri atas puncak-puncak gelombang, sedangkan garis putus-putus menunjukkan dasar-dasar gelombang. Perpotongan garis tebal dan garis putus-putus diberi tanda lingkaran kosong (O). Pada tangki riak, garis sepanjang titik perpotongan itu berwarna agak gelap, yang menunjukkan terjadinya interferensi yang saling melemahkan (destruktif). Di antara garis-garis agak gelap, terdapat pita-pita yang sangat terang dan gelap secara bergantian. Pita sangat terang terjadi jika puncak dua gelombang bertemu (perpotongan garis tebal), dan pita sangat gelap terjadi jika dasar dua gelombang bertemu (perpotongan garis putus-putus). Titik-titik yang paling terang pada pita terang dan titik-titik yang paling gelap pada pita gelap merupakan titik-titik hasil interferensi saling menguatkan.

5. Dispersi

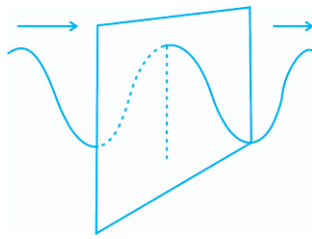
Dispersi adalah peristiwa penguraian sinar cahaya yang merupakan campuran beberapa panjang gelombang menjadi komponen-komponennya karena pembiasan. Dispersi terjadi akibat perbedaan deviasi untuk setiap panjang gelombang, yang disebabkan oleh perbedaan kelajuan masing-masing gelombang pada saat melewati medium pembias.



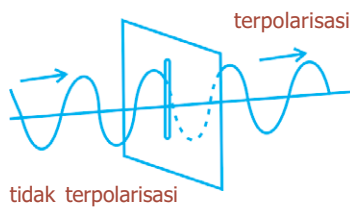
Gambar 1.19 Interferensi gelombang tali.



Gambar 1.20 Interferensi gelombang air.



Gambar 1.21 Gelombang terpolarisasi linier.



Gambar 1.22 Polarisasi gelombang tali.

Apabila sinar cahaya putih jatuh pada salah satu sisi prisma, cahaya putih tersebut akan terurai menjadi komponen-komponennya dan spektrum lengkap cahaya tampak akan terlihat.

6. Polarisasi

Polarisasi merupakan proses pembatasan getaran vektor yang membentuk suatu gelombang transversal sehingga menjadi satu arah. Polarizasi hanya terjadi pada gelombang transversal saja dan tidak dapat terjadi pada gelombang longitudinal. Suatu gelombang transversal mempunyai arah rambat yang tegak lurus dengan bidang rambatnya. Apabila suatu gelombang memiliki sifat bahwa gerak medium dalam bidang tegak lurus arah rambat pada suatu garis lurus, dikatakan bahwa gelombang ini terpolarisasi linear.

Sebuah gelombang tali mengalami polarisasi setelah dilewatkan pada celah yang sempit. Arah bidang getar gelombang tali terpolarisasi adalah searah dengan celah.

Percikan Fisika

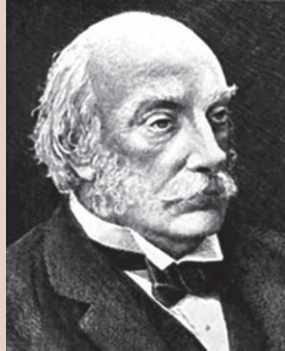


Komunikasi Lewat Satelit

Satelit geostasioner mengedari Bumi pada ketinggian sekitar 35.900 km. Satelit ini beredar pada ketinggian tersebut dengan laju yang mengimbangi laju rotasi planet, sehingga satelit tetap berada di atas lokasi permukaan bumi tertentu. Tahun 1945 penulis cerita fiksi ilmiah Arthur C. Clarke mengisahkan tentang penggunaan satelit geostasioner untuk meneruskan sambungan telepon, siaran televisi, dan sinyal-sinyal lain antarstasiun di permukaan bumi yang terpisah pada jarak ribuan kilometer. Satelit komunikasi geostasioner pertama, Syncom 2, diluncurkan pada tahun 1963. Sejak saat itu, ratusan satelit komunikasi telah ditempatkan di orbit stasioner. Mereka menerima sinyal dari antena pemancar di permukaan bumi, menguatkannya, dan menyalurkan ke antena atau pesawat penerima di berbagai tempat.

Fiesta

Fisikawan Kita



Lord Rayleigh (1842 - 1919)

Lord Rayleigh adalah seorang ahli fisika dari Inggris. Ia lahir pada tanggal 12 November 1842 di Langford Grove, Maldon, Essex Inggris dengan nama John William Strutt, dan meninggal pada 30 Juni 1919 di Terling Place Witham, Essex. Pada tahun 1861 ia masuk kuliah di Trinity College Cambridge dan lulus tahun 1865.

Sumbangan Rayleigh yang lain adalah penjabaran teori gelombang, elektrodinamika, hamburan cahaya, persamaan fungsi gelombang permukaan pada bidang, aliran fluida, hidrodinamika, elektromagnetik, kapilaritas, kekentalan, dan fotografi.

Kilas Balik

- * Gelombang adalah getaran yang merambat melalui medium.
- * Berdasarkan arah rambatnya, gelombang dibedakan menjadi dua, yaitu gelombang transversal dan gelombang longitudinal. Sementara itu, berdasarkan medium perantaranya dibedakan menjadi gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik.
- * Besarnya energi dapat dihitung dengan persamaan: $E = 2\pi^2 \rho S v f^2 A^2$.
Intensitas gelombang dinyatakan: $I = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2$.
- * Gelombang berjalan adalah gelombang mekanik yang memiliki intensitas gelombang konstan di setiap titik yang dilalui gelombang.
- * Dua gelombang dikatakan sefase jika keduanya mempunyai frekuensi sama dan titik-titik yang bersesuaian berada pada tempat yang sama selama osilasi pada saat yang sama.
- * Prinsip superposisi menyatakan bahwa simpangan resultan merupakan jumlah aljabar dari simpangan, baik positif maupun negatif dari masing-masing gelombang.
- * Persamaan gelombang berjalan dinyatakan dengan:
 $y = A \sin (kx - \omega t)$, untuk gelombang sinus yang merambat ke kanan (x positif),
 $y = A \sin (kx + \omega t)$, untuk gelombang sinus yang merambat ke kiri (x negatif).
- * Gelombang stasioner adalah gelombang yang terjadi dari hasil perpaduan dua gelombang yang memiliki amplitudo dan frekuensi sama, tetapi arah rambatnya berlawanan.
- * Persamaan gelombang stasioner adalah: $y = 2A \sin kx \cos \omega t$.
Amplitudo gelombang stasioner pada tali dengan ujung tetap: $A_p = 2A \sin kx$.
Amplitudo gelombang stasioner pada tali dengan ujung bebas: $A_p = 2A \cos kx$.
- * Gelombang memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

- refleksi (pemantulan)	- interferensi (perpaduan)
- refraksi (pembiasan)	- dispersi
- difraksi (pelenturan)	- polarisasi

Uji Kompetensi

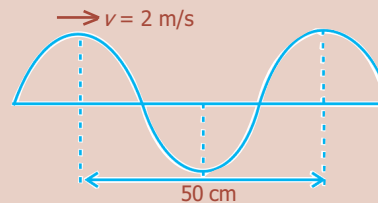
A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Dari suatu tempat ke tempat lain, gelombang memindahkan
 - a. amplitudo
 - b. energi
 - c. fase
 - d. massa
 - e. panjang gelombang
2. Perbedaan gelombang transversal dengan longitudinal terletak pada
 - a. panjang gelombang
 - b. frekuensi
 - c. cepat rambat
 - d. arah getar
 - e. arah rambat
3. Bila gelombang melalui celah sempit, maka terjadi
 - a. refleksi
 - b. refraksi
 - c. difraksi
 - d. interferensi
 - e. polarisasi
4. Pada pembiasan gelombang dari daerah dangkal ke daerah dalam, makin kecil sudut datang, maka
 - a. makin besar sudut bias
 - b. sudut bias tetap
 - c. makin kecil pula sudut bias
 - d. sudut bias tergantung pada indeks bias
 - e. sudut bias dapat menjadi lebih kecil atau lebih besar, tergantung pada cepat rambat gelombang
5. Gelombang stasioner terjadi bila ada dua gelombang menjalar dalam arah berlawanan dengan ketentuan
 - a. mempunyai fase yang sama
 - b. mempunyai frekuensi yang sama
 - c. mempunyai amplitudo yang sama
 - d. mempunyai amplitudo maupun frekuensi yang sama
 - e. mempunyai amplitudo maupun frekuensi berbeda
6. Intensitas gelombang bunyi pada jarak 5 m dari sumber bunyi adalah $2 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$. Pada jarak 10 m dari sumber bunyi intensitasnya adalah
 - a. $0,5 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$
 - b. $1 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$
 - c. $2 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$
 - d. $4 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$
 - e. $8 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$
7. Dalam 3 sekon terbentuk 30 gelombang, berarti frekuensi gelombangnya sebesar
 - a. 3 Hz
 - b. 5 Hz
 - c. 10 Hz
 - d. 15 Hz
 - e. 30 Hz

8. Sebuah gelombang lurus datang pada bidang antara dua medium dengan sudut datang 45° . Jika indeks bias medium 2 relatif terhadap medium 1 adalah $\sqrt{2}$, maka besar sudut adalah
 - a. 60°
 - b. 45°
 - c. 37°
 - d. 30°
 - e. 15°
9. Sebuah slinki menghasilkan gelombang longitudinal dengan jarak renggangan dan rapatan berurutan 7,5 cm. Jika cepat rambat gelombang pada slinki 3 m/s, maka frekuensi gelombangnya adalah
 - a. 3 Hz
 - b. 7,5 Hz
 - c. 10 Hz
 - d. 20 Hz
 - e. 22,5 Hz
10. Jarak antara dua buah titik yang berdekatan dengan fase sama adalah 8 cm. Jika periode gelombang 2 sekon, maka cepat rambat gelombang adalah
 - a. 2 m/s
 - b. 4 m/s
 - c. 8 m/s
 - d. 16 m/s
 - e. 32 m/s

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Dari gambar di samping, tentukan:
 - a. frekuensi,
 - b. periode gelombang!

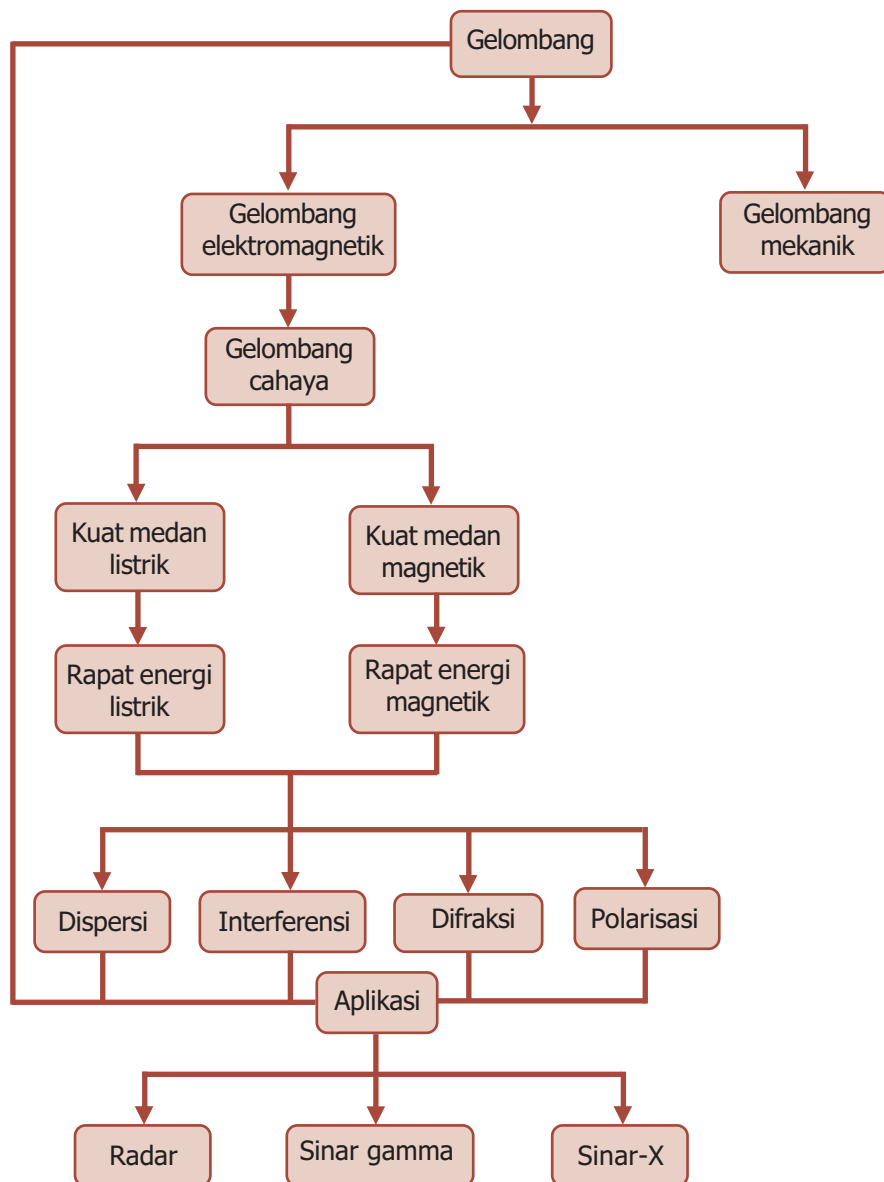


2. Sebuah gelombang berjalan memenuhi persamaan $y = 0,2 \sin 0,4 \pi (60t - x)$. x dan y dalam cm dan t dalam sekon. Tentukan:
 - a. amplitudo gelombang,
 - b. frekuensi gelombang,
 - c. panjang gelombang, dan
 - d. cepat rambat gelombang!
3. Seutas kawat bergetar menurut persamaan:

$$y = (0,4 \text{ cm}) \left[\sin \left(\frac{\pi}{6} \text{ cm}^{-1} \right) \right] \cos (50 \pi \text{ s}^{-1}) t$$
 - a. Berapakah amplitudo dan cepat rambat kedua gelombang yang superposisinya memberikan getaran di atas?
 - b. Berapakah jarak antara simpul yang berdekatan?
4. Persamaan gelombang transversal dinyatakan $(12 \text{ mm}) \sin \left[(20 \text{ m}^{-1})x - (600 \text{ s}^{-1})t \right]$. Hitunglah:
 - a. cepat rambat gelombang,
 - b. kelajuan maksimum partikel!
5. Seberkas cahaya masuk ke dalam air dengan sudut datang 60° . Tentukan:
 - a. sudut biasnya jika diketahui $n_{\text{air}} = \frac{4}{3}$,
 - b. sudut biasnya jika sinar datang dari air ke udara!

PETA KONSEP

Bab 2 GELOMBANG CAHAYA





● Cahaya yang tampak

Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Setiap hari kalian merasakan pengaruh Matahari yang menyinari Bumi. Siang hari tampak terang tidak seperti malam hari, pakaian basah menjadi kering, dan terasa panas menyengat ketika kita berjalan di siang hari. Hal ini dikarenakan radiasi cahaya matahari dapat mencapai permukaan bumi. Cahaya merupakan salah satu bentuk energi yang dapat kita lihat dan kita rasakan pengaruhnya. Cahaya termasuk gelombang karena memiliki sifat-sifat yang sama dengan gelombang. Termasuk gelombang apakah cahaya itu? Mengapa demikian?

Kata Kunci

gelombang elektromagnetik, ggl, induksi, kuat medan listrik, medan magnetik

Pada 1864, fisikawan Inggris, James Clerk Maxwell, mengemukakan teori yang menyebutkan bahwa cahaya adalah rambatan gelombang yang dihasilkan oleh kombinasi medan listrik dan medan magnetik. Gelombang yang dihasilkan oleh medan listrik dan medan magnetik ini disebut gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang transversal yang dapat merambat dalam ruang hampa. Hal inilah yang menyebabkan radiasi cahaya matahari dapat mencapai permukaan bumi.



A. Teori Maxwell

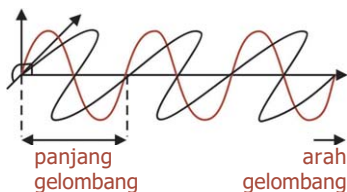
BETA^B Berita Fisika



Hans Christian Oersted menunjukkan bahwa arus listrik dapat membuat jarum kompas berubah arah.

Percobaan yang dilakukan oleh *Hans Christian Oersted* (1777 - 1851), menunjukkan bahwa arus listrik dapat membuat jarum kompas berubah arah. Hal ini membuktikan bahwa di sekitar arus listrik terdapat medan magnet. Kemudian, ilmuwan Prancis *Andre Marie Ampere* (1775 - 1836), menemukan bahwa dua kawat yang bermuatan arus listrik dapat dibuat tarik-menarik atau tolak-menolak, persis seperti magnet. Pada tahun 1865, ilmuwan Skotlandia, *James Clerk Maxwell* (1831 - 1879), menyatakan bahwa medan listrik dan medan magnet berhubungan erat. Maxwell menyadari bahwa jika suatu arus listrik dialirkan maju-mundur, arus itu dapat menimbulkan gelombang elektromagnetik yang berubah-ubah yang memancar keluar dengan kecepatan yang sangat tinggi. Perhitungan-perhitungannya menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik itu memancar pada kecepatan cahaya. Berdasarkan hal ini, *Maxwell* menyimpulkan bahwa cahaya itu sendiri adalah bentuk gelombang elektromagnetik.

Medan listrik dan medan magnetik selalu saling tegak lurus, dan keduanya tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang. Jadi, gelombang elektromagnetik merupakan gelombang transversal. Cepat rambat gelombang elektromagnetik tergantung pada permeabilitas vakum (μ_0) dan permitivitas vakum (ϵ_0) sesuai dengan hubungan:



Gambar 2.1 Medan listrik tegak lurus dengan medan magnetik dan tegak lurus terhadap arah gelombang.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Permeabilitas vakum diketahui sebesar $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$ dan permitivitas vakum adalah $8,85 \times 10^{-12} \text{ C/Nm}^2$, sehingga diperoleh nilai $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.



B. Energi dalam Gelombang Elektromagnetik

1. Hubungan Kuat Medan Listrik dengan Medan Magnetik

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal yang terdiri dari osilasi medan listrik, medan magnetik, yang satu sama lain saling tegak lurus dan berubah secara periodik, seperti pada Gambar 2.2. Arah perambatan gelombang elektromagnetik dalam sumbu x positif, sedangkan sumbu y menunjukkan arah rambat medan listrik E , dan sumbu z merupakan arah perambatan medan magnet B .

Berdasarkan persamaan *Maxwell*, diperoleh bahwa gelombang elektromagnetik adalah suatu gelombang sinusoida dengan medan listrik E dan medan magnet B berubah terhadap jarak x dan waktu t menurut persamaan:

$$E = E_m \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$B = B_m \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (2.3)$$

E_m dan B_m adalah nilai maksimum amplitudo medan listrik dan medan magnetik. Konstanta k disebut *bilangan gelombang* (*wave number*), yang nilainya setara dengan $2\pi/\lambda$, dengan λ adalah panjang gelombang. Adapun $\omega = 2\pi f$, dengan f adalah frekuensi getaran. Sehingga diperoleh:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda \cdot f = c \dots\dots\dots (2.4)$$

Turunan parsial $\frac{\partial E}{\partial x}$ dari persamaan (2.2), berarti t dianggap bilangan tetap, dan turunan parsial $\frac{\partial B}{\partial t}$ dari persamaan (2.3), berarti x dianggap tetap, sehingga:

$$E = E_m \cos(kx - \omega t)$$

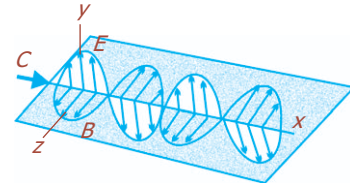
$$\frac{\partial E}{\partial x} = E_m [-k \sin(kx - \omega t)]$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -kE_m \sin(kx - \omega t) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$B = B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = B_m [\omega \sin(kx - \omega t)]$$

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \sin(kx - \omega t) \dots\dots\dots (2.6)$$



Gambar 2.2 Gelombang elektromagnetik merambatkan energi medan listrik dan medan magnetik.

Komet

Kolom mengingat

Medan listrik berosilasi tegak lurus medan magnet dan arah gerak gelombang. Medan magnet berosilasi tegak lurus medan listrik dan arah gerak gelombang.

Persamaan gelombang elektromagnetik seperti persamaan (2.2) dan (2.3) harus memenuhi hubungan:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Dari persamaan (2.5) dan (2.6), maka:

$$-kE_m \sin(kx - \omega t) = \omega B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$kE_m = \omega B_m$$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k}$$

karena $\frac{\omega}{k} = c$, dari persamaan (2.4) maka:

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{E}{B} = c \dots\dots\dots (2.7)$$

Dapat disimpulkan bahwa setiap saat, nilai perbandingan antara amplitudo medan listrik dengan amplitudo medan magnetik dari suatu gelombang elektromagnetik adalah sama dengan cepat rambat cahaya.

Contoh Soal

Suatu gelombang bidang elektromagnetik sinusoida dengan frekuensi 50 MHz berjalan di angkasa dalam arah sumbu x positif. Pada berbagai titik dan berbagai waktu, medan listrik E memiliki nilai maksimum 720 N/C dan merambat sepanjang sumbu y . Tentukan:

- panjang gelombang,
- besar dan arah medan magnetik B ketika $E = 720$ N/C!

Penyelesaian:

Diketahui: $f = 50 \text{ MHz} = 50 \times 10^6 \text{ Hz} = 5 \times 10^7 \text{ Hz}$

$E_m = 720 \text{ N/C}$

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Ditanya: a. $\lambda = \dots ?$

b. $B_m = \dots ?$

Jawab:

a. $c = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$
 $= \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^7} = 6 \text{ m}$

b. $\frac{E_m}{B_m} = c \rightarrow B_m = \frac{E_m}{c}$
 $= \frac{720}{3 \times 10^8} = 2,4 \times 10^{-6} \text{ T}$

Karena E dan B tegak lurus dan keduanya harus tegak lurus dengan arah perambatan gelombang (sumbu x), maka disimpulkan bahwa B ada dalam arah sumbu z .

2. Rapat Energi Listrik dan Rapat Energi Magnetik

Energi yang tersimpan dalam sebuah kapasitor merupakan usaha untuk muatan listrik. Demikian pula untuk mengisi kapasitor dari keadaan kosong (nol) sampai bermuatan q diperlukan sejumlah energi. Besar energi tersebut dirumuskan:

$$W = \frac{1}{2} q \cdot V \dots \dots \dots (2.8)$$

karena $q = C \cdot V$, maka berlaku:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

dengan:

- W = energi yang tersimpan (joule)
- V = beda potensial (volt)
- q = jumlah muatan (coulomb)
- C = kapasitas kapasitor (farad)

Apabila kapasitor keping sejajar mempunyai luas penampang A dan jarak antara kedua keping adalah d , maka kapasitasnya dinyatakan:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

Sementara itu, medan listrik E dinyatakan dengan:

$$V = E \cdot d$$

Dengan demikian,

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \right) (E \cdot d)^2$$

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot A \cdot d$$

Hasil kali luas keping A dan jarak antara kedua keping d sama dengan volume kapasitor V , sehingga energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah:

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V$$

Rapat energi listrik (u_e) adalah energi per satuan volume, maka:

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \dots \dots \dots (2.9)$$

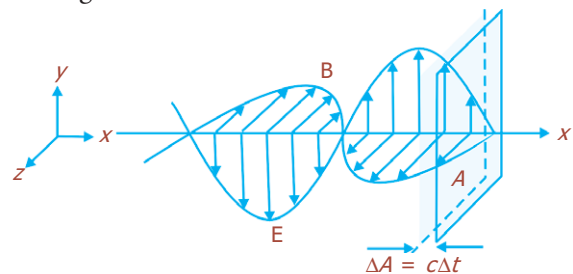
dengan:

- u_e = rapat energi (J/m³ atau Jm⁻³)
- ϵ_0 = permitivitas vakum ($8,85 \times 10^{-12}$ C²/Nm²)
- E = kuat medan listrik (N/C)

Kecepatan gelombang elektromagnetik adalah:

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{(8,85 \times 10^{-12})(4\pi \times 10^{-7})}} \\ &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Nilai ini sama dengan kelajuan cahaya.



Gambar 2.3 Gelombang elektromagnetik membawa energi melalui luasan A .

Rapat energi magnetik atau energi magnetik per satuan volume (u_m), merupakan perbandingan antara energi yang tersimpan dalam solenoida dengan volumenya.

$$u_m = \frac{W}{\text{volume}} = \frac{\frac{1}{2} LI^2}{\text{volume}}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0 AN^2}{l} \right) I^2}{Al} = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{NI}{l} \right)^2 = \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\mu_0 IN}{l} \right)^2$$

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

u_m = rapat energi magnetik (J/m³)

B = kuat medan magnetik (Wb/m² = tesla)

μ_0 = permeabilitas vakum ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am)

3. Intensitas Gelombang Elektromagnetik

Intensitas gelombang elektromagnetik atau laju energi yang dipindahkan melalui gelombang elektromagnetik disebut *pointing* (lambang S). Secara vektor, *pointing* didefinisikan sebagai:

$$S = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \dots\dots\dots (2.11)$$

Arah S adalah searah dengan arah perambatan gelombang elektromagnetik, dan dinyatakan dalam satuan W/m². Karena E dengan B saling tegak lurus ($\sin 90^\circ = 1$), sesuai dengan persamaan gelombang bidang elektromagnetik, maka secara skalar persamaan (2.10) dapat ditulis menjadi:

$$S = \frac{EB}{\mu_0} = \frac{E_m B_m \cos^2(kx - \omega t)}{\mu_0} \dots\dots\dots (2.12)$$

Untuk $\cos^2(kx - \omega t) = 1$, nilai persamaan (2.12) adalah maksimum, yaitu $S_{\text{maks}} = \frac{E_m B_m}{\mu_0}$.

Sementara itu, untuk $\cos^2(kx - \omega t) = 0$, nilai persamaan (2.12) adalah minimum, yaitu $S_{\text{min}} = 0$. Dengan demikian, nilai intensitas rata-rata adalah:

$$\bar{S} = \frac{S_{\text{maks}} + S_{\text{min}}}{2}$$

$$\bar{S} = \frac{(E_m B_m / \mu_0) + 0}{2}$$

$$\bar{S} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0} \dots\dots\dots (2.13)$$

Rapat energi sesaat karena medan listrik (u_e) dinyatakan dengan $u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$, dan rapat energi sesaat medan magnet (u_m) dinyatakan $u_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$. Dengan menggunakan hubungan $c = E/B$ dan $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, maka persamaan di

atas menjadi:

$$u_m = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{(E/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0})^2}{2\mu_0}$$

$$u_m = \frac{E^2 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_0}{2\mu_0} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

maka, $u_m = u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$ (2.14)

Persamaan (2.14) menunjukkan bahwa energi gelombang elektromagnetik terdiri atas energi medan listrik dan energi medan magnetik. Rapat energi sesaat total (u) dari gelombang elektromagnetik adalah jumlah rapat energi medan listrik dan medan magnetik. Jumlah rapat energi medan listrik dan medan magnetik merupakan rapat energi total gelombang elektromagnetik (u).

$$u = u_e + u_m = 2 u_m = \frac{B^2}{\mu_0}$$
 (2.15)

Perbandingan $\frac{E}{B} = c$, sedangkan nilai $\cos^2(kx - \omega t) = \frac{1}{2}$. Maka diperoleh rapat energi total rata-rata adalah:

$$\bar{u} = \frac{\bar{E} \bar{B}}{\mu_0 c} = \frac{E_m B_m}{\mu_0 c} \cos^2(kx - \omega t) = \frac{E_m B_m}{\mu_0 c} \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$\bar{u} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0 c}$$
 (2.16)

Bandingkan dengan laju rata-rata, \bar{S}

$$\bar{S} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0}$$
 (2.17)

Sehingga persamaan (2.13) dapat ditulis menjadi:

$$\bar{u} = \frac{\bar{S}}{c} \text{ atau } \bar{S} = c \cdot \bar{u}$$

Jadi, laju rata-rata per m³ yang dipindahkan melalui gelombang elektromagnetik sama dengan rapat energi rata-rata dikalikan dengan cepat rambat cahaya.

Contoh Soal

Suatu sumber titik dari radiasi elektromagnetik memiliki daya rata-rata 600 W. Tentukan:

- amplitudo maksimum medan listrik dan medan magnetik pada titik yang berjarak 2 m dari sumber radiasi,
- rapat energi rata-rata pada titik yang berjarak 2 m dari sumber radiasi!

Penyelesaian:

- Satuan dari laju energi rata-rata per m² yang dipindahkan melalui gelombang elektromagnetik \bar{S} adalah W/m², ini tak lain adalah satuan intensitas gelombang.

$$I = \frac{\bar{P}}{A} = \frac{\bar{P}}{4\pi r^2}, \text{ dengan } \bar{P} \text{ daya rata-rata (watt)}$$

$$\bar{S} = \frac{\bar{P}}{4\pi r^2}, \quad \bar{S} = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c^2}$$

$$\frac{E_m^2}{2\mu_0 c^2} = \frac{\bar{P}}{4\pi r^2}$$

$$E_m^2 = \frac{\mu_0 c^2 \bar{P}}{2\pi r^2}$$

$$E_m = \sqrt{\frac{\mu_0 c^2 \bar{P}}{2\pi r^2}}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$P = 600 \text{ W}$$

$$r = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} E_m &= \sqrt{\frac{(4\pi \times 10^{-7})(3 \times 10^8)(600)}{2\pi(2)^2}} \\ &= \sqrt{\frac{1200 \times 3 \times 10^1}{4}} = \sqrt{\frac{36 \times 10^3}{4}} = \sqrt{9 \times 10^3} = 94,9 \text{ V/m} \end{aligned}$$

Amplitudo medan magnetik B_m , dapat dihitung dengan:

$$B_m = \frac{E_m}{c} = \frac{94,9}{3 \times 10^8} = 31,6 \times 10^{-8} = 3,2 \times 10^{-7} \text{ T}$$

- Rapat energi rata-rata

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{B_m^2}{2\mu_0} \\ &= \frac{(3,2 \times 10^{-7})^2}{2(4\pi \times 10^{-7})} \\ &= \frac{(3,2 \times 10^{-7})^2}{25,12 \times 10^{-7}} = \frac{10,24 \times 10^{-14}}{25,12 \times 10^{-7}} = 0,408 \times 10^{-7} = 4,08 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3 \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 2.1

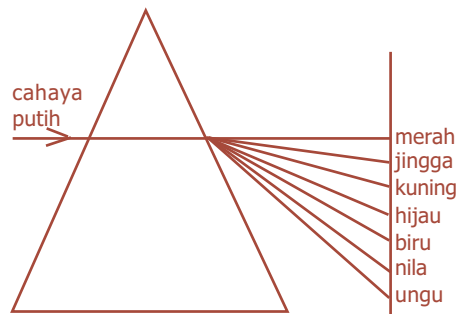
1. Hitung panjang gelombang untuk:
 - a. gelombang elektromagnetik 70 Hz,
 - b. gelombang radio 85,5 MHz, dan
 - c. berkas sinar tampak berfrekuensi $2,35 \times 10^{14}$ Hz!
2. Radiasi dari Matahari mencapai Bumi dengan kelajuan 1.425 J/s.m^2 . Jika dianggap hanya ada satu gelombang elektromagnetik, hitunglah nilai maksimum E_m dan B_m !



C. Sifat-Sifat Gelombang Cahaya

1. Dispersi

Dispersi adalah peristiwa penguraian cahaya putih (polikromatik) menjadi komponen-komponennya karena pembiasan. Komponen-komponen warna yang terbentuk yaitu merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu. Dispersi terjadi akibat adanya perbedaan deviasi untuk setiap panjang gelombang, yang disebabkan oleh perbedaan kelajuan masing-masing gelombang pada saat melewati medium pembias. Gambar 2.4 menunjukkan dispersi sinar putih yang melalui sebuah prisma.

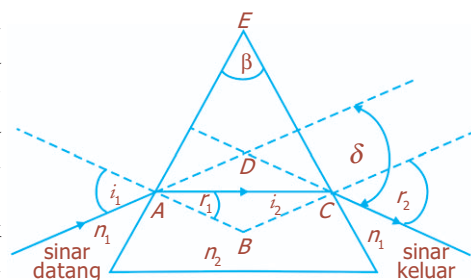


Gambar 2.4 Dispersi sinar putih oleh prisma.

a. Pembiasan Cahaya pada Prisma

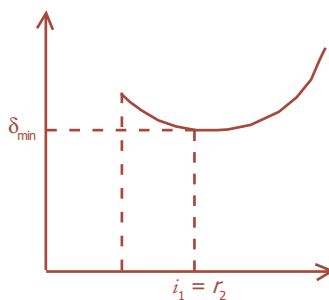
Prisma adalah benda bening (transparan) terbuat dari gelas yang dibatasi oleh dua bidang permukaan yang membentuk sudut tertentu yang berfungsi menguraikan (sebagai pembias) sinar yang mengenainya. Permukaan ini disebut bidang pembias, dan sudut yang dibentuk oleh kedua bidang pembias disebut **sudut pembias** (β).

Cahaya yang melalui prisma akan mengalami dua kali pembiasan, yaitu saat memasuki prisma dan meninggalkan prisma. Jika sinar datang mula-mula dan sinar bias akhir diperpanjang, maka keduanya akan berpotongan di suatu titik dan membentuk sudut yang disebut **sudut deviasi**. Jadi, sudut deviasi (δ) adalah sudut yang dibentuk oleh perpanjangan sinar datang mula-mula dengan sinar yang meninggalkan bidang pembias atau pemantul. Gambar 2.5 menunjukkan sudut deviasi pada pembiasan prisma.



Gambar 2.5 Sudut deviasi pada pembiasan prisma.

Pelangi merupakan contoh dispersi oleh butiran-butiran air hujan. Butiran-butiran air hujan memantulkan sinar matahari ke arah kita sehingga terurai menjadi warna pelangi.



Gambar 2.6 Grafik sudut deviasi terhadap sudut datang pada prisma.

Pada segiempat ABCE berlaku hubungan:

$$\beta + \angle ABC = 180^\circ$$

Pada segitiga ABC berlaku hubungan:

$$r_1 + i_2 + \angle ABC = 180^\circ$$

sehingga diperoleh hubungan:

$$\beta + \angle ABC = r_1 + i_2 + \angle ABC$$

$$\beta = r_1 + i_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan:

β = sudut pembias prisma

i_2 = sudut datang pada permukaan 2

r_1 = sudut bias pada permukaan 1

Pada segitiga ACD, $\angle ADC + \angle CAD + \angle ACD = 180^\circ$

dengan $\angle CAD = i_1 - r_1$ dan $\angle ACD = r_2 - i_2$, sehingga berlaku hubungan:

$$\angle ADC + (i_1 - r_1) + (r_2 - i_2) = 180^\circ$$

$$\angle ADC = 180^\circ + (r_1 + i_2) - (i_1 + r_2)$$

Jadi, sudut deviasi (δ) adalah:

$$\delta = 180^\circ - \angle ADC$$

$$= 180^\circ - [180^\circ + (r_1 + i_2) - (i_1 + r_2)]$$

$$= (i_1 + r_2) - (r_1 + i_2)$$

Diketahui $\beta = r_1 + i_2$ (persamaan (2.18)), maka besar sudut deviasi yang terjadi pada prisma adalah:

$$\delta = (i_1 + r_2) - \beta \dots\dots\dots (2.19)$$

dengan:

δ = sudut deviasi

i_1 = sudut datang mula-mula

r_2 = sudut bias kedua

β = sudut pembias

Sudut deviasi berharga minimum ($\delta = 0$) jika sudut datang pertama (i_1) sama dengan sudut bias kedua (r_2).

Secara matematis dapat dituliskan syarat terjadinya deviasi minimum (δ_m) adalah $i_1 = r_2$ dan $r_1 = i_2$, sehingga persamaan (2.19) dapat dituliskan kembali dalam bentuk:

$$\delta_m = (i_1 + i_1) - \beta$$

$$= 2i_1 - \beta$$

$$i_1 = \frac{\delta_m + \beta}{2} \dots\dots\dots (2.20)$$

Selain itu, deviasi minimum juga bisa terjadi jika $r_1 = i_2$, maka dari persamaan (2.18) diperoleh:

$$\beta = r_1 + r_1 = 2r_1$$

$$r_1 = \frac{1}{2}\beta \dots\dots\dots (2.21)$$

Bila dihubungkan dengan Hukum Snellius diperoleh:

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin r_1$$

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Masukkan i_1 dari persamaan (2.20) dan r_1 dari persamaan (2.21) sehingga:

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_m + \beta)}{\sin \frac{1}{2}\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin \frac{(\delta_m + \beta)}{2} = \frac{n_2}{n_1} \sin \frac{\beta}{2} \dots\dots\dots (2.22)$$

Untuk sudut pembias yang kecil ($\beta < 15^\circ$):

$$\delta_m = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \beta \dots\dots\dots (2.23)$$

Jika n_1 = udara, maka $n_1 = 1$, sehingga persamaan di atas menjadi:

$$\delta_m = (n_2 - 1) \beta \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan:

- n_1 = indeks bias medium
- n_2 = indeks bias prisma
- β = sudut pembias (puncak) prisma
- δ_m = sudut deviasi minimum

b. Sudut Dispersi

Sudut dispersi merupakan sudut yang dibentuk antara deviasi sinar satu dengan sinar lain pada peristiwa dispersi (penguraian cahaya). Sudut ini merupakan selisih deviasi antara sinar-sinar yang bersangkutan.

Jika sinar-sinar polikromatik diarahkan pada prisma, maka akan terjadi penguraian warna (sinar monokromatik) yang masing-masing sinar mempunyai deviasi tertentu.

Selisih sudut deviasi antara dua sinar adalah sudut dispersi, Φ . Sebagai contoh, pada Gambar 2.7 dapat dinyatakan:

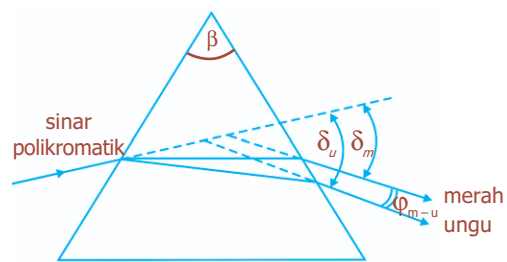
deviasi sinar merah $\delta_m = (n_m - 1)\beta$

deviasi sinar ungu $\delta_u = (n_u - 1)\beta$

Komet

Kolom mengingat

Pada prisma berlaku hubungan:
 sudut pembiasan
 $\beta = r_1 + i_2$ dan
 sudut deviasi
 $\delta = (i_1 + r_2) - \beta$



Gambar 2.7 Dispersi sinar merah terhadap sinar ungu.

Dengan demikian, dispersi sinar merah terhadap ungu sebesar:

$$\begin{aligned}\varphi &= \delta_u - \delta_m \dots\dots\dots (2.25) \\ &= (n_u - 1)\beta - (n_m - 1)\beta\end{aligned}$$

$$\boxed{\varphi = (n_u - n_m)\beta \dots\dots\dots (2.26)}$$

dengan:

φ = sudut dispersi

n_u = indeks bias warna ungu

n_m = indeks bias warna merah

β = sudut pembias prisma

Contoh Soal

Sebuah sinar jatuh pada sisi AB dari sebuah prisma segitiga ABC masuk ke dalam prisma dan kemudian menumbuk AC. Jika sudut pembias prisma 40° dan indeks bias prisma $\frac{3}{2}$, tentukan sudut deviasi minimum prisma!

Penyelesaian:

Diketahui: $\beta = 40^\circ$; $n_2 = \frac{3}{2}$; $n_1 = 1$ (udara)

Ditanya: $\delta_m = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\sin \frac{1}{2}(\delta_m + \beta) &= \frac{n_2}{n_1} \sin \frac{\beta}{2} \\ \sin \frac{1}{2}(\delta_m + 40^\circ) &= \frac{\frac{3}{2}}{1} \sin \left(\frac{40^\circ}{2} \right) \\ \sin \frac{1}{2}(\delta_m + 40^\circ) &= \frac{3}{2} \sin 20^\circ \\ \sin \frac{1}{2}(\delta_m + 40^\circ) &= \frac{3}{2} (0,34) \\ \sin \frac{1}{2}(\delta_m + 40^\circ) &= 0,51 \\ \frac{1}{2}(\delta_m + 40^\circ) &= 30^\circ \\ \frac{1}{2} \delta_m &= 30^\circ - 20^\circ \\ \delta_m &= 20^\circ\end{aligned}$$

Uji Kemampuan 2.2

Sebuah prisma dengan sudut pembias prisma 45° dikenai sinar datang pada salah satu sisi dengan sudut datang 60° . Jika indeks bias prisma $\frac{3}{2}$, berapakah sudut deviasi prisma?

2. Interferensi Cahaya

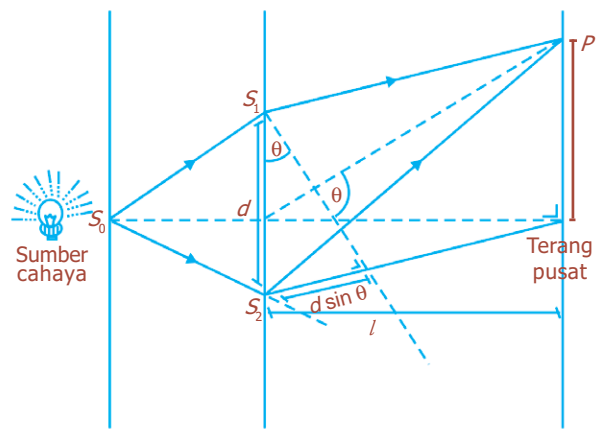
Interferensi adalah paduan dua gelombang atau lebih menjadi satu gelombang baru. Interferensi terjadi jika terpenuhi dua syarat berikut ini.

- Kedua gelombang cahaya harus koheren, dalam arti bahwa kedua gelombang cahaya harus memiliki beda fase yang selalu tetap, oleh sebab itu keduanya harus memiliki frekuensi yang sama.
- Kedua gelombang cahaya harus memiliki amplitudo yang hampir sama.

a. Interferensi Celah Ganda

Fenomena interferensi cahaya ditunjukkan oleh percobaan yang dilakukan oleh Thomas Young. Berkas cahaya yang melalui celah S_1 dan S_2 berasal dari celah sempit S_0 , tampak pada Gambar 2.8.

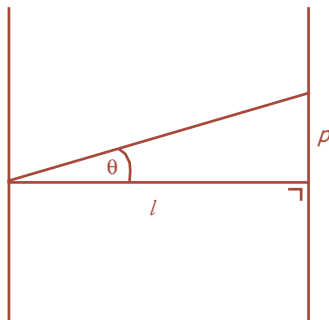
Jika berkas cahaya melalui S_1 dan S_2 , maka celah tersebut (S_1 dan S_2) akan berfungsi sebagai sumber cahaya baru dan menyebarkan sinarnya ke segala arah. Apabila cahaya dari celah S_1 dan S_2 berinterferensi, maka akan terbentuk suatu pola interferensi. Pola interferensi tersebut dapat ditangkap pada layar berupa pola garis terang dan gelap. Interferensi dapat terjadi karena adanya beda lintasan berkas cahaya dari S_1 dan S_2 . Jika jarak antara kedua celah (d), jauh lebih kecil daripada jarak celah terhadap layar, l ($d \ll l$), maka beda lintasan pada titik sembarang P adalah $S_2P - S_1P = d \sin \theta$.



Gambar 2.8 Diagram percobaan celah ganda Young.

1) Interferensi Maksimum

Apabila dua gelombang bertemu, dan saling menguatkan, maka akan terjadi interferensi maksimum dan terbentuk pola garis terang. Pada celah ganda, interferensi ini akan terjadi apabila kedua gelombang memiliki fase yang sama (sefase), yaitu apabila keduanya berfrekuensi sama dan titik-titik yang bersesuaian berada pada tempat yang sama selama osilasi pada saat yang sama.



Gambar 2.9 Sudut θ sangat kecil sehingga $\sin \theta = \tan \theta = \frac{p}{l}$.

BETA[®] Berita Fisika

Kancing logam yang dibuat oleh John Barton pada tahun 1830 masing-masing mempunyai pola garis-garis halus yang ditorehkan pada permukaannya. Garis-garis tersebut memantulkan cahaya matahari yang terang sehingga gelombang-gelombang yang sebelah-menyebelah saling menginterferensi.

Jarak garis terang ke- n dari pusat terang dinyatakan dengan persamaan:

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin \theta \quad (2.27)$$

Karena $l \gg d$, maka sudut θ sangat kecil, sehingga berlaku

$$\text{pendekatan } \sin \theta = \tan \theta = \frac{p}{l}.$$

Jadi, persamaan (2.27) dapat dituliskan menjadi:

$$n \cdot \lambda = d \frac{p}{l}$$

$$n \cdot \lambda = \frac{pd}{l} \quad (2.28)$$

dengan:

p = jarak garis terang dari pusat terang

d = jarak kedua sumber

l = jarak layar ke sumber cahaya

λ = panjang gelombang

n = orde atau nomor terang ($n = 0, 1, 2, \dots$)

2) Interferensi Minimum

Interferensi maksimum terjadi jika dua gelombang bertemu dan saling menguatkan. Namun, jika dua gelombang tidak bertemu, dan akan saling meniadakan maka terjadi interferensi minimum, sehingga terbentuk pola garis gelap. Interferensi ini terjadi pada dua gelombang yang tidak sefase. Jarak garis gelap ke- n dari pusat terang adalah:

$$\left(n - \frac{1}{2}\right) \lambda = d \cdot \sin \theta \quad (2.29)$$

Bilangan n menyatakan orde atau nomor gelap, yang besarnya $n = 1, 2, 3, \dots$. Untuk $n = 1$ disebut minimum orde ke-1.

Mengingat $\sin \theta = \frac{p}{l}$, maka persamaan (2.29) menjadi:

$$\left(n - \frac{1}{2}\right) \lambda = d \frac{p}{l} \quad (2.30)$$

dengan p adalah jarak gelap ke- n dari pusat terang.

Pada interferensi celah ganda, jarak dua garis terang yang berurutan sama dengan jarak dua garis gelap yang berurutan. Dengan menggunakan persamaan (2.28) diperoleh:

$$\frac{\Delta p d}{l} = \Delta n \lambda \quad (2.31)$$

Untuk dua garis terang maupun dua garis gelap berurutan dapat dikatakan nilai $\Delta n=1$, sehingga jarak antara dua garis terang maupun jarak antara dua garis gelap berurutan dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\frac{\Delta pd}{l} = \lambda \dots\dots\dots (2.32)$$

b. Interferensi pada Lapisan Tipis

Dalam kehidupan sehari-hari kita sering melihat fenomena yang ditimbulkan oleh interferensi cahaya. Sebagai contoh timbulnya garis-garis berwarna yang tampak pada lapisan tipis minyak tanah yang tumpah di permukaan air, warna-warni yang terlihat pada gelembung sabun yang mendapat sinar matahari, serta timbulnya warna-warni pada cakram padat (*compact disc*). Pola interferensi pada lapisan tipis dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu panjang lintasan optik dan perubahan fase sinar pantul.

Dari Gambar 2.11, sinar AB merupakan sinar monokromatik yang datang pada permukaan pelat tipis. Sebagian sinar AB dipantulkan oleh permukaan bidang batas udara dan pelat (sinar BE) dan sebagian lagi dibiaskan ke dalam medium pelat (sinar BC). Sinar BC dipantulkan oleh permukaan bidang batas pelat dan udara (sinar CD). Sinar CD dipantulkan oleh permukaan atas dan sebagian lagi dibiaskan keluar film (sinar DF). Sinar BE dan DF datang bersamaan di mata kita.

Sinar datang dengan sudut datang i pada lapisan tipis dengan ketebalan d dan indeks bias n , sehingga sinar mengalami pemantulan dan pembiasan dengan sudut bias r . Dengan mempertimbangkan kedua faktor di atas, dapat ditentukan syarat-syarat terjadinya interferensi berikut ini.

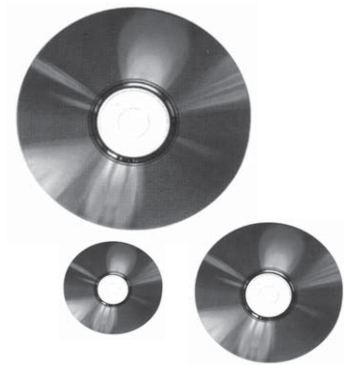
1. Syarat terjadinya interferensi maksimum (terang)

$$2n.d.\cos r = (m - \frac{1}{2})\lambda; m = 1, 2, 3, \dots\dots\dots (2.33)$$
2. Syarat terjadinya interferensi minimum (gelap)

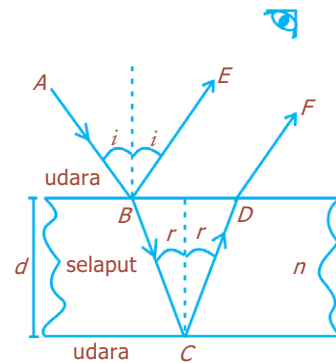
$$2n.d.\cos r = m\lambda; m = 0, 1, 2, \dots\dots\dots (2.34)$$

c. Cincin Newton

Cincin Newton adalah pola interferensi yang terbentuk oleh sebuah lensa yang sedikit cembung yang diletakkan di atas sebuah keping gelas datar. Bila cahaya monokromatik dipantulkan oleh kedua permukaan yang berdekatan ke mata pengamat dengan sudut tertentu, titik singgung lensa akan terlihat sebagai sebuah lingkaran gelap dikelilingi sederet cincin terang dan gelap.



Gambar 2.10 Timbulnya warna-warni pada *compact disc* menunjukkan adanya interferensi.

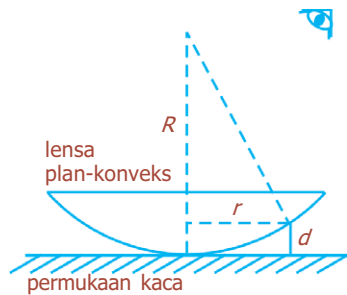


Gambar 2.11 Interferensi pada lapisan tipis.



Sumber: *Jendela Iptek Cahaya*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 2.12 Cincin Newton untuk memeragakan interferensi.



Gambar 2.13 Pola interferensi cincin Newton terjadi jika cahaya datang dari atas dengan arah tegak lurus.

Pola interferensi cincin Newton ini terjadi jika cahaya dengan panjang gelombang λ , datang dari atas dengan arah tegak lurus. Jika R adalah jari-jari kelengkungan lensa dan r adalah jari-jari kelengkungan gelap dan terang hasil interferensi, maka akan terjadi hal-hal berikut ini.

1. Interferensi maksimum (lingkaran terang), jika:

$$r_t^2 = \left(n - \frac{1}{2}\right) \lambda \cdot R; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.35)$$

dengan r_t adalah jari-jari lingkaran terang ke- n .

2. Interferensi minimum (lingkaran gelap), jika:

$$r_g^2 = n \cdot \lambda \cdot R; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.36)$$

dengan r_g adalah jari-jari lingkaran gelap ke- n .

Contoh Soal

Dua celah yang berjarak 1 mm, disinari cahaya merah dengan panjang gelombang $6,5 \times 10^{-7}$ m. Garis gelap terang dapat diamati pada layar yang berjarak 1 m dari celah. Hitunglah jarak antara gelap ketiga dan terang pusat, serta jarak antara terang kedua dengan garis terang keempat!

Penyelesaian:

Diketahui: $d = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$

$\lambda = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m}$

$l = 1 \text{ m}$

Ditanya: a. $p = \dots ?$

b. $\Delta p = \dots ?$

Jawab:

- a. Jarak antara gelap ketiga dengan terang pusat

$$\frac{pd}{l} = \left(n - \frac{1}{2}\right) \lambda$$

$$p = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda l}{d} = \left(3 - \frac{1}{2}\right) \left(\frac{6,5 \times 10^{-7} \times 1}{10^{-3}} \right)$$

$$= 2,5 \left(\frac{6,5 \times 10^{-7}}{10^{-3}} \right)$$

$$= 16,25 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$p = 1,6 \text{ mm}$$

- b. Jarak antara terang kedua dan terang keempat

$$\frac{\Delta p d}{l} = \Delta n \lambda$$

$$\Delta p = \frac{\Delta n \lambda l}{d} = \frac{(4 - 2)(6,5 \times 10^{-7})(1)}{10^{-3}} = 13 \times 10^{-4}$$

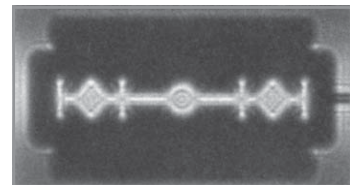
$$\Delta p = 1,3 \times 10^{-3} \text{ m} = 1,3 \text{ mm}$$

Uji Kemampuan 2.3

1. Dalam suatu percobaan celah ganda Young diketahui jarak kedua sumber 0,8 mm yang disinari dengan cahaya yang memiliki panjang gelombang 0,8 μm . Hitunglah sudut pisah yang dibentuk oleh garis-garis gelap yang berdekatan!
2. Pada sebuah eksperimen celah ganda yang digunakan cahaya dengan panjang gelombang 0,6 μm . Hasil percobaan diketahui jarak antara tiga garis-garis gelap yang berdekatan adalah 2 mm. Tentukan jarak antara dua garis yang berdekatan jika digunakan cahaya dengan panjang gelombang 0,9 μm !

3. Difraksi Cahaya

Difraksi cahaya adalah peristiwa penyebaran atau pembelokan gelombang oleh celah sempit sebagai penghalang. Gelombang terdifraksi selanjutnya berinterferensi satu sama lain sehingga menghasilkan daerah penguatan dan pelemahan.



Sumber: *Fisika Jilid 2*, Erlangga, 2001

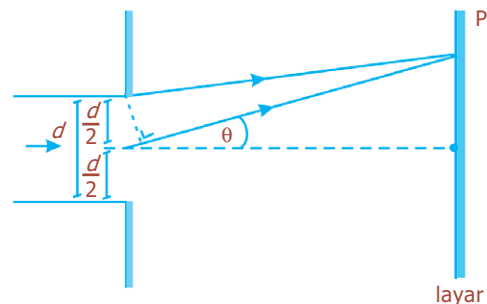
Gambar 2.14 Pola difraksi pada pisau cukur sehingga tampak diperbesar.

a. Difraksi Celah Tunggal

Dalam topik ini akan dibahas difraksi Fraunhofer yang dihasilkan oleh celah tunggal. Salah satu jenis difraksi Fraunhofer, yaitu difraksi dengan sumber cahaya dan layar penerima berada pada jarak tak terhingga dari benda penyebab difraksi, sehingga muka gelombang tidak lagi diperlakukan sebagai bidang sferis, melainkan sebagai bidang datar. Dengan kata lain, difraksi ini melibatkan berkas cahaya sejajar.

Pada Gambar 2.15 menunjukkan gelombang cahaya dengan panjang gelombang λ didifraksikan oleh celah sempit dengan lebar d . Pola gelap dan terang terbentuk ketika gelombang cahaya mengalami interferensi.

Beda lintasan ke titik P adalah $(\frac{d}{2})\sin\theta$, dengan θ adalah sudut antara garis tegak lurus terhadap celah dan garis dari pusat celah ke P. Apabila beda lintasan yang terjadi adalah $\frac{1}{2}\lambda$, maka kedua cahaya (Gambar 2.15) akan saling memperlemah dan menyebabkan terjadinya interferensi minimum sehingga pada layar terbentuk pola gelap.



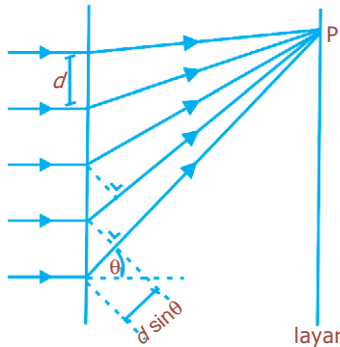
Gambar 2.15 Difraksi celah tunggal.

Jadi, pola gelap (difraksi minimum) terjadi jika:

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda; n = 1, 2, 3 \dots \dots \dots (2.37)$$

Sementara itu, pola terang (difraksi maksimum) terjadi bila:

$$d \cdot \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda; n = 1, 2, 3 \dots \dots \dots (2.38)$$



Gambar 2.16 Kisi difraksi

b. Difraksi Celah Majemuk (Kisi Difraksi)

Kisi difraksi merupakan piranti untuk menghasilkan spektrum dengan menggunakan difraksi dan interferensi, yang tersusun oleh celah sejajar dalam jumlah sangat banyak dan memiliki jarak yang sama (biasanya dalam orde 1.000 per mm). Dengan menggunakan banyak celah, garis-garis terang dan gelap yang dihasilkan pada layar menjadi lebih tajam. Bila banyaknya garis (celah) per satuan panjang, misalnya cm adalah N , maka tetapan kisi d adalah:

$$d = \frac{1}{N} \dots \dots \dots (2.39)$$

Bila cahaya dilewatkan pada kisi dan diarahkan ke layar, maka pada layar akan terjadi hal-hal berikut ini.

1. Garis terang (maksimum), bila:

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda; n = 0, 1, 2, \dots \dots \dots (2.40)$$

2. Garis gelap (minimum), bila:

$$d \cdot \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda; n = 1, 2, 3, \dots \dots \dots (2.41)$$

Kemampuan lensa untuk membebaskan bayangan dari dua titik benda yang sangat dekat disebut **resolusi lensa**. Jika dua titik benda sangat dekat, maka pola difraksi bayangan yang terbentuk akan tumpang tindih.

Kriteria Rayleigh menyatakan bahwa “dua bayangan dapat diuraikan jika pusat piringan difraksi salah satunya persis di atas minimum pertama pola difraksi yang lainnya”. Ukuran kemampuan alat optik untuk membentuk bayangan terpisahkan dari benda-benda rapat atau untuk memisahkan panjang gelombang radiasi yang rapat disebut **daya urai**.

BETA[®] Berita Fisika

Tahun 1665 Francesco Grimaldi memperlihatkan bahwa cahaya tampak berbelok dan memancar melebar jika melewati celah sempit. Ia menamakan pembelokan itu “difraksi”.

Contoh Soal

Celah tunggal yang lebarnya 0,1 mm disinari berkas cahaya dengan panjang gelombang 4.000 Å. Apabila pola difraksi ditangkap pada layar yang jaraknya 20 cm dari celah, tentukan jarak antara garis gelap ketiga dan garis pusat terang!

Penyelesaian:

Diketahui: $d = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$
 $\lambda = 4.000 \text{ \AA} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}$
 $l = 20 \text{ cm} = 2 \times 10^{-1} \text{ m}$

Jarak garis gelap ketiga dari pusat terang p dapat dihitung dari rumus jarak gelap ke- n dari pusat terang. Jadi,

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$

$$\frac{pd}{l} = n \cdot \lambda$$

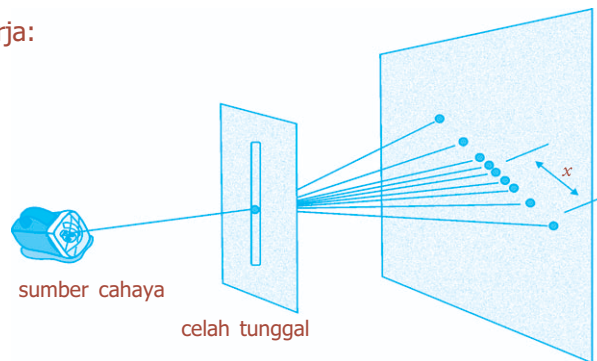
Untuk garis gelap ke-3 maka $n = 3$

$$\begin{aligned} p &= \frac{3l\lambda}{d} \\ &= \frac{(3)(2 \times 10^{-1})(4 \times 10^{-7})}{10^{-4}} \\ &= \frac{24 \times 10^{-8}}{10^{-4}} \\ &= 24 \times 10^{-4} = 2,4 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kegiatan

Tujuan : Melakukan percobaan difraksi pada celah tunggal.
Alat dan bahan : Sumber cahaya laser atau lampu sorot yang kuat, celah tunggal yang terbuat dari kertas disilet sepanjang $\pm 2,5 \text{ cm}$, penggaris, layar.

Cara Kerja:



1. Pasang alat percobaan seperti gambar.
2. Sinarilah celah itu dengan laser.
3. Tangkaplah bayangannya dengan layar.
4. Ukurlah jarak yang sesuai dengan orde yang ditinjau.
5. Ukurlah jarak x .

Diskusi:

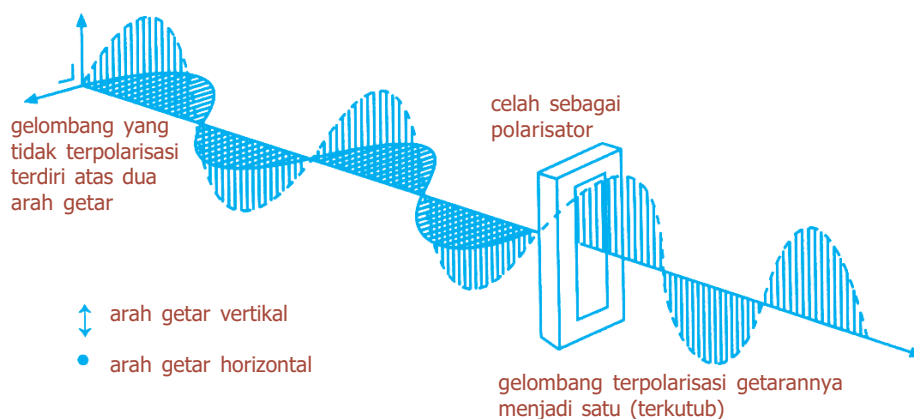
1. Bila dilakukan dengan lampu sorot, hitung banyak garis gelap terang yang terjadi!
2. Apa yang dapat kalian simpulkan dari percobaan tersebut?

Uji Kemampuan 2.4

Cahaya monokromatik dari sebuah sumber mengenai sebuah celah tunggal yang mempunyai diameter celah 0,06 cm. Jarak garis gelap kedua terhadap pusat terang adalah 0,12 cm. Jika jarak celah terhadap layar 2,4 m, berapakah panjang gelombang cahaya tersebut?

4. Polarisasi Cahaya

Polarisasi adalah proses pembatasan gelombang vektor yang membentuk suatu gelombang transversal sehingga menjadi satu arah. Tidak seperti interferensi dan difraksi yang dapat terjadi pada gelombang transversal dan longitudinal, efek polarisasi hanya dialami oleh gelombang transversal. Cahaya dapat mengalami polarisasi menunjukkan bahwa cahaya termasuk gelombang transversal. Pada cahaya tidak terpolarisasi, medan listrik bergetar ke segala arah, tegak lurus arah rambat gelombang. Setelah mengalami pemantulan atau diteruskan melalui bahan tertentu, medan listrik terbatas pada satu arah. Polarisasi dapat terjadi karena pemantulan pada cermin datar, absorpsi selektif dari bahan polaroid, dan bias kembar oleh kristal.



Gambar 2.17 Cahaya termasuk gelombang transversal yang dapat mengalami polarisasi.

a. Polarisasi karena Pembiasan dan Pemantulan

Polarisasi cahaya yang dipantulkan oleh permukaan transparan akan maksimum bila sinar pantul tegak lurus terhadap sinar bias. Sudut datang dan sudut pantul pada saat polarisasi maksimum disebut *sudut Brewster* atau *sudut polarisasi* (i_p).

Arah sinar pantul (i_p) tegak lurus dengan sinar bias (r'), maka berlaku:

$$i_p + r' = 90^\circ \dots\dots\dots (2.42)$$

$$\text{atau } r' = 90^\circ - i_p$$

Menurut Snellius:

$$n = \frac{\sin i_p}{\sin r'} = \frac{\sin i_p}{\sin(90^\circ - i_p)} = \frac{\sin i_p}{\cos i_p} \dots\dots\dots (2.43)$$

$$n = \tan i_p$$

dengan:

n = indeks bias relatif bahan polarisator terhadap udara

i_p = sudut pantul

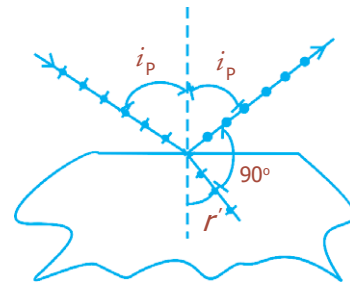
r' = sudut bias

b. Polarisasi karena Pembiasan Ganda (Bias Kembar)

Bias ganda merupakan sifat yang dimiliki beberapa kristal tertentu (terutama kalsit) untuk membentuk dua sinar bias dari suatu sinar datang tunggal. Sinar bias (*ordinary ray*) mengikuti hukum-hukum pembiasan normal. Sinar bias lain, yang dinamakan sinar luar biasa (*extraordinary ray*), mengikuti hukum yang berbeda. Kedua sinar tersebut bergerak dengan kelajuan yang sama, di mana cahaya sinar biasa terpolarisasi tegak lurus terhadap cahaya sinar luar biasa.

c. Polarisasi karena Absorpsi Selektif

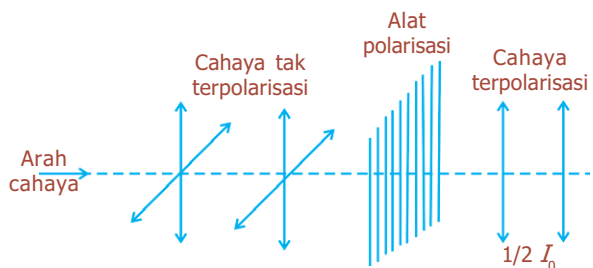
Cahaya yang terpolarisasi bidang bisa diperoleh dari cahaya yang tidak terpolarisasi dengan menggunakan bahan bias ganda yang disebut *polaroid*. Polaroid terdiri atas molekul panjang yang rumit yang tersusun paralel satu sama lain. Jika satu berkas cahaya terpolarisasi bidang jatuh pada polaroid yang sumbuanya membentuk sudut θ terhadap arah polarisasi datang,



Gambar 2.18 Polarisasi

BETA Berita Fisika

Pada tahun 1812 Francois Arago membuat salah satu filter polarisasinya yang pertama yang dibuat dari lembaran kaca yang ditumpuk.



Gambar 2.19 Perubahan intensitas cahaya dari cahaya tidak terpolarisasi menjadi cahaya terpolarisasi.

amplitudonya akan diperkecil sebesar $\cos \theta$. Karena intensitas berkas cahaya sebanding dengan kuadrat amplitudo, maka intensitas terpolarisasi bidang yang ditransmisikan oleh alat polarisasi adalah:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan I_0 adalah intensitas datang.

Alat polarisasi menganalisis untuk menentukan apakah cahaya terpolarisasi dan untuk menentukan bidang polarisasi adalah polaroid.

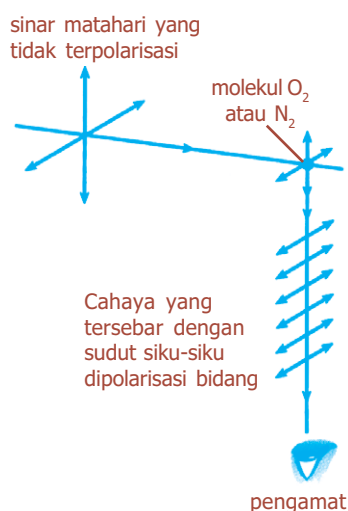
Cahaya yang tidak terpolarisasi terdiri atas cahaya dengan arah polarisasi (vektor medan listrik) yang acak, yang masing-masing arah polarisasinya diuraikan menjadi komponen yang saling tegak lurus. Ketika cahaya yang tidak terpolarisasi melewati alat polarisasi, satu dari komponen-komponennya dihilangkan. Jadi, intensitas cahaya yang lewat akan diperkecil setengahnya karena setengah dari cahaya tersebut dihilangkan.

$$I = \frac{1}{2} I_0 \dots\dots\dots (2.45)$$

d. Polarisasi karena Hamburan

Hamburan didefinisikan sebagai suatu peristiwa penyerapan dan pemancaran kembali suatu gelombang cahaya oleh partikel. Fenomena yang menerapkan prinsip ini antara lain warna biru pada langit dan warna merah yang terlihat ketika Matahari terbenam.

Penghamburan cahaya oleh atmosfer bumi bergantung pada panjang gelombang (λ). Untuk partikel-partikel dengan panjang gelombang yang jauh dari panjang gelombang cahaya, misalnya molekul udara, hal itu tidak menjadi rintangan yang terlalu besar bagi λ yang panjang dibandingkan dengan λ yang pendek. Penghamburan yang terjadi berkurang menurut $\frac{1}{\lambda^4}$. Matahari memberikan sinar putih yang dihamburkan oleh molekul udara ketika memasuki atmosfer bumi. Sinar biru dihamburkan lebih banyak daripada warna lain, sehingga langit tampak berwarna biru. Ketika Matahari terbenam, berada di kerendahan langit, cahaya dari akhir spektrum biru dihamburkan. Matahari terlihat berwarna kemerahan karena warna dari akhir spektrum lewat ke mata kita, tetapi warna biru lolos. Proses penghamburan yang terjadi menjelaskan polarisasi cahaya langit.



Gambar 2.20 Penghamburan cahaya oleh atmosfer bumi.

Contoh Soal

Jika sudut antara kedua sumbu polarisasi pada kedua polaroid adalah 60° , tentukan intensitas cahaya yang diteruskan oleh polaroid pertama dengan intensitas I_0 dan polaroid kedua!

Penyelesaian:

Diketahui: $\theta = 60^\circ$

Ditanya: $I_1 = \dots ?$
 $I_2 = \dots ?$

Jawab:

$$I_1 = \frac{1}{2}I_0$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{2}I_0 \cos^2 \theta \\ &= \frac{1}{2}I_0 \cos^2 60^\circ \\ &= 0,125I_0 \end{aligned}$$

Percikan Fisika



Peraga Kristal Cair

Peraga kristal cair, yang dalam bahasa Inggris disebut *Liquid Crystal Display* (LCD), berisi dua filter polarisasi yang saling menyilang menghalangi semua cahaya. Namun, di antara kedua filter itu terdapat lapisan kristal cair. Selama tenaga listrik alat ini dipadankan, kristalnya memutar sinar-sinar cahaya yang lewat dengan membentuk sudut 90° . Sinar-sinar yang terputar itu kemudian dapat menembus filter belakang. Sinar-sinar itu dipantulkan oleh cermin sehingga peraga tampak putih. Angka atau huruf pada peraga terjadi dengan cara “menyalakan” daerah-daerah kristal cair. Ini mengubah kristal itu sehingga kristal-kristal tersebut tidak lagi memutar cahaya.

Uji Kemampuan 2.5

1. Cahaya datang dari udara ke air dengan membentuk sudut polarisasi 30° . Hitunglah besarnya sudut polarisasi pada bidang batas yang sama tetapi dari kaca ke udara!
2. Sebuah sumber cahaya dilihat melalui dua lembar polaroid yang arah sumbu polarisasinya mula-mula sejajar. Selanjutnya, salah satu polaroid harus diputar untuk mengurangi intensitas cahaya yang ditentukan dari nilainya semula. Berapakah besar sudut yang harus diputar?



D. Efek Doppler pada Gelombang Elektromagnetik



Pada tahun 1842 Christian Doppler menjelaskan mengapa bunyi terdengar seakan-akan lebih tinggi ketika sumbernya mendekati daripada ketika bergerak menjauh.

Cahaya termasuk gelombang elektromagnetik karena dalam perambatannya tanpa melalui medium perantara. Frekuensi dan panjang gelombang yang diukur akan berubah sedemikian rupa sehingga hasil perkaliannya yaitu kecepatan cahaya, tetap konstan. Pergeseran frekuensi seperti itu dinamakan pergeseran Doppler. Untuk radiasi elektromagnetik, laju cahaya c merupakan ciri perhitungan dan karena tidak ada medium tetap sebagai kerangka acuan, relativitas harus ikut diperhitungkan, sehingga:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \dots\dots\dots (2.46)$$

dengan v merupakan kelajuan sumber dan pengamat yang bergerak saling menjauhi. Bila $\frac{v^2}{c^2}$ lebih kecil dibandingkan dengan 1, dengan kata lain bila kelajuan pemisahan lebih kecil dibandingkan dengan laju cahaya, persamaan (2.46) menjadi lebih sederhana, yaitu:

$$f = f_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \dots\dots\dots (2.47)$$

Perlu diingat bahwa persamaan (2.46) dan (2.47) hanya berlaku untuk pengamat dan sumber yang saling menjauhi.



E. Aplikasi Gelombang Cahaya

1. Radar



Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Gambar 2.21 Salah satu contoh bentuk radar.

Gelombang cahaya yang merupakan gelombang transversal diterapkan dalam kehidupan sehari-hari, seperti pada radar, sinar gamma, dan sinar-X yang bermanfaat dalam bidang pengetahuan dan pengobatan. Radar (*Radio Detection and Ranging*) memancarkan gelombang cahaya dengan prinsip pemantulan cahaya. Radar merupakan suatu sistem alat untuk mendeteksi keberadaan, letak, kecepatan, dan arah gerak benda-benda di kejauhan, seperti pesawat terbang dan kapal, melalui kemampuan benda-benda tersebut untuk memantulkan seberkas radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang beberapa sentimeter.

Radar juga digunakan untuk navigasi dan pemanduan. Sistem alat ini terdiri atas pemancar yang menghasilkan radiasi frekuensi radio, seringkali berupa denyut, yang diberikan pada antena yang dapat dipindah-pindahkan yang kemudian dipancarkan sebagai berkas radiasi. Bila berkas terganggu oleh suatu benda padat, sebagian energi radiasi akan dipantulkan kembali ke antena. Sinyal yang diterima antena diteruskan ke penerima, yang kemudian memperkuat dan mendeteksinya. Gema dari pantulan benda padat ditunjukkan oleh kenaikan mendadak pada keluaran detektor. Waktu yang dibutuhkan denyut untuk mencapai benda dan untuk dipantulkan kembali (t) dapat diketahui dari persamaan:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \dots\dots\dots (2.48)$$

dengan d menyatakan jarak sasaran, dan c merupakan laju cahaya. Keluaran detektor biasanya ditampilkan pada tabung sinar katoda dan berbagai bentuk tampilan yang berbeda (Gambar 2.22).

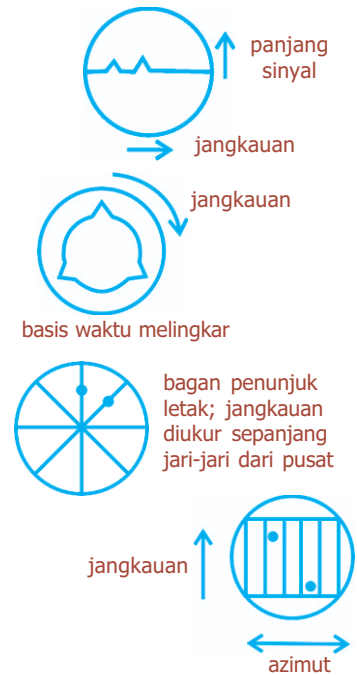
Radar dibedakan beberapa jenis, antara lain radar cuaca, radar pengawas pelabuhan udara, radar pengawas umum, radar pesawat udara, radar sonde, dan radar surveillance.

2. Sinar Gamma

Sinar gamma merupakan radiasi gelombang elektromagnetik yang terpancar dari inti atom dengan energi yang sangat tinggi. Sinar gamma mempunyai frekuensi antara 10^{20} Hz dengan panjang gelombang antara 10^{-11} cm sampai 10^{-8} cm. Daya tembusnya besar sekali, sehingga dapat menembus pelat timbal dan pelat besi yang tebalnya beberapa cm. Sinar gamma banyak dimanfaatkan dalam bidang ilmu pengetahuan dan pengobatan. Dalam bidang pengetahuan, sinar gamma digunakan untuk membantu studi fisika inti dan astronomi. Dalam bidang pengobatan, sinar gamma dimanfaatkan untuk diagnosis dan terapi kanker. Saat ini sedang dikembangkan penerapan sinar gamma untuk penyucihamaan dan pengawetan makanan.

3. Sinar-X

Sinar-X ditemukan pada tahun 1895 oleh Wilhelm K Rontgen, disebut juga sinar rontgen. Sinar-X mempunyai frekuensi antara 10^{16} Hz sampai 10^{20} Hz. Panjang gelombangnya sangat pendek yaitu 10^{-9} cm - 10^{-6} cm.



Gambar 2.22 Jenis tampilan radar tabung sinar katoda.



Sumber: *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar*, PT Ichtiar Baru van Hoeve, 2005

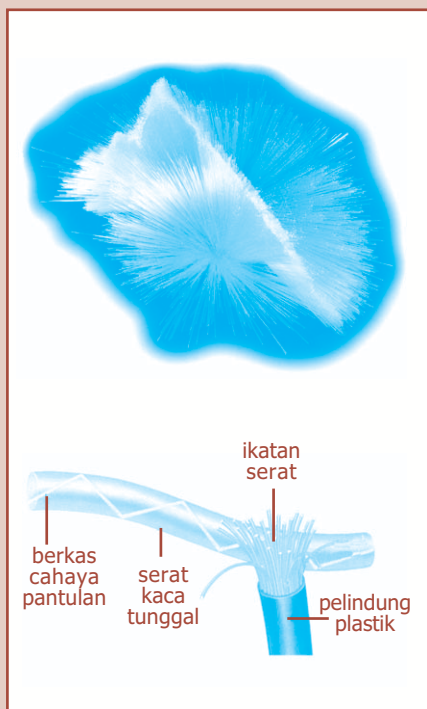
Gambar 2.23 Sinar-X untuk melihat kondisi dalam tubuh tanpa pembedahan.

Karena panjang gelombangnya sangat pendek sinar-X mempunyai daya tembus yang kuat. Sinar-X dapat menembus benda-benda lunak seperti daging dan kulit, tetapi tidak dapat menembus benda-benda keras seperti hidung, gigi, dan logam. Karena itu sinar ini sering dimanfaatkan di dalam bidang kedokteran, terutama untuk melihat kondisi dalam tubuh tanpa melakukan pembedahan.

Foto sinar-X diambil menggunakan kamera sinar-X. Bagian-bagian tubuh yang keras akan menahan sinar-X sehingga bagian ini memancarkan sinar fluoresens pada film.

Selain di bidang kedokteran, sinar-X juga digunakan untuk mendeteksi suatu benda. Di bandara, hotel, dan pusat perbelanjaan untuk memeriksa barang-barang yang dibawa oleh pengujung atau penumpang. Sinar-X juga digunakan dalam teknik radiografi untuk menguji sebuah benda dan memeriksa kerusakan atau cacat pada mesin. Sinar-X juga sering dimanfaatkan untuk memeriksa struktur kristal.

Percikan Fisika



Serat Optik

Serat optik adalah sebuah teknologi yang memanfaatkan benang kaca, yang disebut serat optik, untuk meneruskan sinar. Pemantulan internal total menahan pantulan sinar di dalam serat optik sehingga bagaimanapun serat ditekuk dan diliuk, pulsa sinar di dalam kabel serat optik dapat menghantar sinyal data dan telepon menempuh jarak sangat jauh. Para ahli bedah menggunakan serat optik untuk melihat paru-paru dan organ lain di dalam tubuh. Peralatan yang disebut endoskop memiliki sebundel serat optik yang meneruskan cahaya ke ujung endoskop, bundel kedua menghantar balik sinyal gambar.

Lampu pada gambar memanfaatkan serat optik untuk menciptakan efek dekoratif. Utas-utas serat optik diikat menjadi satu, sedangkan ujung-ujung yang lain diburai. Cahaya ditapis dengan filter berwarna sebelum dilewatkan melalui ikatan, sehingga cahaya dapat keluar sebagai pancaran titik-titik terang pada ujung-ujung serat yang terburai dan terbuka.

Fiesta

Fisikawan Kita



James Clerk Maxwell (1831 - 1879)

Ahli fisika dari Skotlandia yang lahir di Edinburgh pada tanggal 13 November 1831 dan meninggal di Cambridge Inggris pada tanggal 5 November 1879. Pada umur 15 tahun ia telah dapat membuat karya tulis tentang membuat oval dan menyerahkannya pada Lembaga Ilmu Pengetahuan Edinburgh.

Setelah tamat dari Akademi Edinburgh, Maxwell kuliah di Peterhouse dan Trinity College. Ia sangat produktif, penemuannya antara lain teori kinetik gas, teori medan listrik dan medan magnet, serta penemu statistik Maxwell-Boltzmann dan meramalkan adanya gelombang elektromagnetik.

Kilas Balik

- * Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dalam perambatannya tanpa memerlukan medium perantara.
- * Kecepatan rambat gelombang elektromagnetik: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$.
- * Energi dalam gelombang elektromagnetik: $E = E_m \cos(kx - \omega t)$; $B = B_m \cos(kx - \omega t)$

Hubungan E dengan B: $\frac{E_m}{B_m} = \frac{E}{B} = c$.

- * Rapat energi listrik dan rapat energi magnetik:

$$u_e = \frac{W}{V}$$

$$= \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

- * Intensitas gelombang elektromagnetik:

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \times B$$

$$S = \frac{E_m B_m}{2\mu_0}$$

- * Hubungan antara intensitas gelombang dengan rapat energi:

$$u_m = u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$\bar{u} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0 c}$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{S}}{c} \text{ atau } \bar{S} = c \cdot \bar{u}$$

- * Sudut deviasi pada prisma:

$$\delta = (i_1 + r_2) - \beta$$

$$\sin \left(\frac{\delta_m + \beta}{2} \right) = \frac{n_2}{n_1} \sin \frac{\beta}{2}$$

$$\text{jika } \beta < 15^\circ, \text{ maka: } \delta_m = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \beta$$

- * Sudut dispersi dirumuskan:

$$\varphi = (n_u - n_m) \beta$$

- * Interferensi celah ganda

- Syarat interferensi maksimum (terang)

$$d \sin \theta = n\lambda; n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\frac{p \cdot d}{l} = n\lambda$$

- Syarat interferensi minimum (gelap)

$$d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda; n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{p \cdot d}{l} = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda$$

- * Cincin Newton

- Syarat terjadinya interferensi maksimum (lingkaran terang)

$$r_t^2 = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda R; n = 1, 2, 3, \dots$$

- Syarat terjadinya interferensi minimum (lingkaran gelap)

$$r_g^2 = n \lambda R; n = 0, 1, 2, \dots$$

- * Difraksi celah tunggal

- Pola difraksi minimum (gelap)

$$d \sin \theta = n\lambda; n = 1, 2, 3, \dots$$

- Pola difraksi maksimum (terang)

$$d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda; n = 1, 2, 3, \dots$$

* Difraksi celah majemuk

- Pola difraksi maksimum

$$d \sin \theta = n\lambda ; n = 0, 1, 2, \dots$$

- Pola difraksi minimum

$$d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2} \right) \lambda ; n = 1, 2, 3, \dots$$

* Efek Doppler pada gelombang elektromagnetik

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

untuk sumber dan pengamat yang bergerak saling menjauhi.

* Gelombang cahaya diterapkan antara lain pada:

- radar,
- sinar gamma, dan
- sinar-X.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Kelajuan energi rata-rata gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan dengan persamaan di bawah ini, *kecuali*

a. $\bar{S} = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c}$

d. $\bar{S} = \frac{B_m^2 c}{\mu_0}$

b. $\bar{S} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0}$

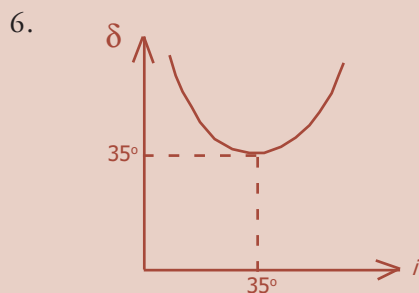
e. $\bar{S} = c \cdot \bar{u}$

c. $\bar{S} = \frac{B_m^2 c}{2\mu_0}$

2. Kuat medan magnetik gelombang elektromagnetik adalah 6×10^{-8} T. Maka kuat medan listriknya

- a. 21 N/C
- b. 18 N/C
- c. 9,0 N/C
- d. 3 N/C
- e. 0,5 N/C

3. Intensitas rata-rata radiasi gelombang elektromagnetik yang memiliki rapat energi rata-rata $1,6 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$ adalah
 - a. $1,6 \text{ Wm}^{-1}$
 - b. $2,4 \text{ Wm}^{-1}$
 - c. $3,6 \text{ Wm}^{-1}$
 - d. $4,8 \text{ Wm}^{-1}$
 - e. $5,6 \text{ Wm}^{-1}$
4. Cahaya polikromatik yang mengenai prisma akan mengalami peristiwa
 - a. refleksi
 - b. difraksi
 - c. dispersi
 - d. interferensi
 - e. polarisasi
5. Cahaya adalah gelombang transversal, karena cahaya dapat mengalami peristiwa
 - a. refleksi
 - b. difraksi
 - c. dispersi
 - d. interferensi
 - e. polarisasi



Grafik hubungan antara sudut deviasi (δ) dengan sudut datang (i) pada percobaan cahaya dengan prisma adalah seperti pada gambar di samping. Prisma tersebut memiliki sudut pembias sebesar

- a. 5°
 - b. 10°
 - c. 15°
 - d. 35°
 - e. 60°
7. Seberkas cahaya jatuh tegak lurus mengenai dua celah yang berjarak 0,4 mm. Garis terang ketiga pada layar berjarak 0,5 mm dari terang pusat. Jika jarak layar dengan celah adalah 40 cm, maka panjang gelombang cahaya tersebut adalah
 - a. 400 mm
 - b. 200 mm
 - c. 170 mm
 - d. 120 mm
 - e. 100 mm

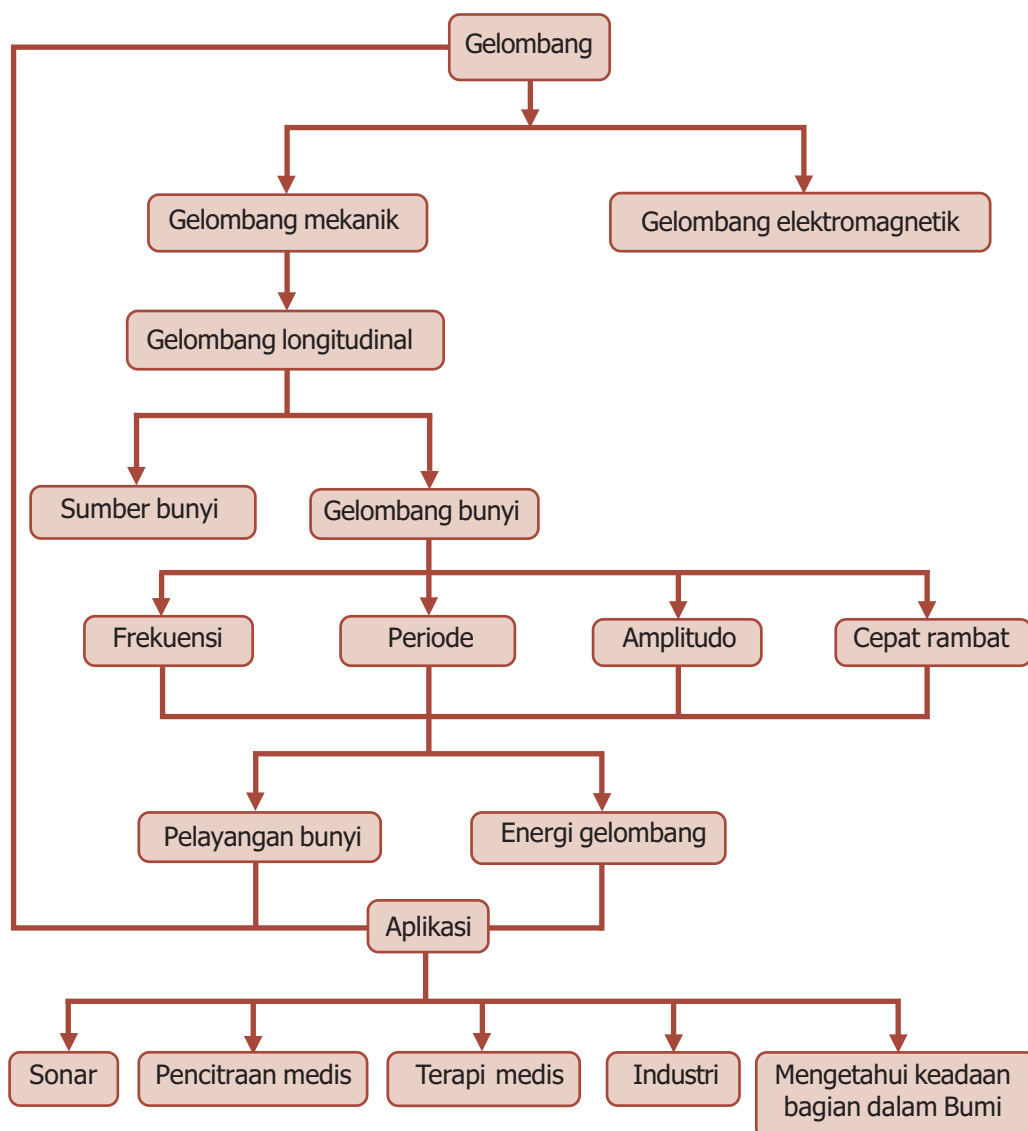
8. Jari-jari lingkaran terang pertama pada cincin Newton adalah 1 mm. Jika jari-jari plan-konveks adalah 4 m, maka panjang gelombang cahaya yang digunakan adalah
 - a. 4.000 Å
 - b. 4.500 Å
 - c. 5.000 Å
 - d. 5.500 Å
 - e. 6.000 Å
9. Seberkas cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 5.000 Å dilewatkan pada kisi difraksi sehingga garis terang kedua terjadi dengan sudut deviasi 30° terhadap garis normal. Kisi tersebut memiliki jumlah garis per milimeter sebesar
 - a. 250
 - b. 500
 - c. 1.000
 - d. 2.000
 - e. 4.000
10. Suatu benda hitam pada suhu 27 °C memancarkan energi 2R J/s. Benda hitam tersebut dipanasi hingga suhunya menjadi 327 °C. Besar energi yang dipancarkan adalah
 - a. 4R
 - b. 8R
 - c. 16R
 - d. 32R
 - e. 64R

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Cahaya dengan panjang gelombang 640 nm mengenai sebuah kisi difraksi yang terdiri atas 2.000 garis/cm. Tentukan:
 - a. orde maksimum yang mungkin terjadi,
 - b. jumlah garis gelap yang masih teramati pada layar!
2. Sebuah sakarimeter memiliki tabung yang panjangnya 15 cm yang berisi larutan gula dengan konsentrasi 20%. Jika sudut putar larutan adalah 5,2 °/cm, tentukan sudut pemutaran bidang polarisasi cahaya oleh larutan tersebut!
3. Medan listrik dalam suatu gelombang elektromagnetik memiliki puncak 60 mV/m. Berapa laju rata-rata energi per satuan luas yang dipindahkan gelombang elektromagnetik tersebut?
4. Sebuah sumber cahaya monokromatik memancarkan daya elektromagnetik 250 W merata ke segala arah. Tentukan:
 - a. rapat energi rata-rata pada jarak 1 m dari sumber,
 - b. rapat energi magnetik rata-rata pada jarak yang sama dari sumber,
 - c. intensitas gelombang pada lokasi tersebut!
5. Sebuah laser 150 MW memancarkan berkas sinar sempit dengan diameter 2,00 mm. Berapa nilai maksimum dari E dan B dalam berkas laser tersebut?

PETA KONSEP

Bab 3 GELOMBANG BUNYI



BAB

3

GELOMBANG BUNYI



Sumber: *Dokumen Penerbit*, 2006

- Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak lepas dari bunyi.

Setiap saat kita dapat mendengarkan bunyi. Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak lepas dari bunyi karena bunyi menjadi salah satu cara untuk dapat berkomunikasi dengan orang lain. Perhatikan gambar di atas. Tanpa bunyi kita tidak dapat mengetahui maksud orang lain yang berada jauh dari kita. Dalam perambatannya, bunyi memerlukan medium sehingga bisa mencapai ke indra pendengaran kita. Bagaimana bunyi merambat? Marilah kita pelajari uraian tentang sifat bunyi berikut ini sehingga sangat bermanfaat dalam kehidupan kita.

Kata Kunci

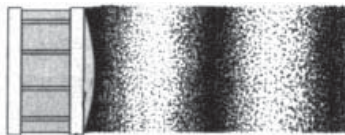
amplitudo, bunyi, frekuensi, gelombang longitudinal, gelombang transversal, infrasonik, ultrasonik

Bunyi merupakan getaran di dalam medium elastis pada frekuensi dan intensitas yang dapat didengar oleh telinga manusia. Bunyi termasuk gelombang mekanik, karena dalam perambatannya bunyi memerlukan medium perantara, yaitu udara. Ada tiga syarat agar terjadi bunyi. Syarat yang dimaksud yaitu ada sumber bunyi, medium, dan pendengar. Bunyi dihasilkan oleh benda yang bergetar, getaran itu merambat melalui medium menuju pendengar.

Sama seperti gelombang lainnya, sumber gelombang bunyi merupakan benda yang bergetar. Energi dipindahkan dari sumber dalam bentuk gelombang bunyi. Selanjutnya, bunyi dideteksi oleh telinga. Oleh otak, bunyi diterjemahkan, dan kita bisa memberikan respon. Misalnya, ketika kita mendengarkan suara lagu dari radio, kita meresponnya dengan ikut bernyanyi, atau sekadar menggoyangkan kaki.

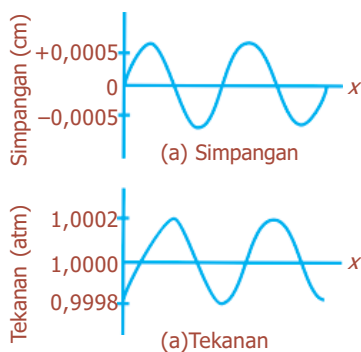


A. Bunyi merupakan Gelombang Longitudinal



Sumber: *Fisika Jilid 1*, Erlangga, 2001

Gambar 3.1 Partikel-partikel membentuk daerah bertekanan tinggi dan rendah.



Gambar 3.2 Representasi gelombang bunyi dalam ruang pada satu waktu digambarkan sebagai (a) simpangan, dan (b) tekanan.

Gelombang bunyi merupakan gelombang longitudinal, yaitu gelombang yang terdiri atas partikel-partikel yang berosilasi searah dengan gerak gelombang tersebut, membentuk daerah bertekanan tinggi dan rendah (rapatan dan renggangan). Partikel yang saling berdesakan akan menghasilkan gelombang bertekanan tinggi, sedangkan molekul yang meregang akan menghasilkan gelombang bertekanan rendah. Kedua jenis gelombang ini menyebar dari sumber bunyi dan bergerak secara bergantian pada medium.

Gelombang bunyi dapat bergerak melalui zat padat, zat cair, dan gas, tetapi tidak bisa melalui vakum, karena di tempat vakum tidak ada partikel zat yang akan mentransmisikan getaran. Kemampuan gelombang bunyi untuk menempuh jarak tertentu dalam satu waktu disebut **kecepatan bunyi**. Kecepatan bunyi di udara bervariasi, tergantung temperatur udara dan kerapatannya. Apabila temperatur udara meningkat, maka kecepatan bunyi akan bertambah. Semakin tinggi kerapatan udara, maka bunyi semakin cepat merambat. Kecepatan bunyi dalam zat cair lebih besar daripada cepat rambat bunyi di udara. Sementara itu, kecepatan bunyi pada zat padat lebih besar daripada cepat rambat bunyi dalam zat cair dan udara. Tabel 3.1 menunjukkan cepat rambat bunyi pada berbagai materi.

Tabel 3.1 Laju bunyi di berbagai materi pada 20 °C dan 1 atm

Materi	Laju (m/s)
Udara	343
Udara (0 °C)	331
Helium	1.005
Hidrogen	1.300
Air	1.440
Air laut	1.560
Besi dan baja	5.000
Kaca	4.500
Aluminium	5.100
Kayu keras	4.000



B. Sifat Bunyi

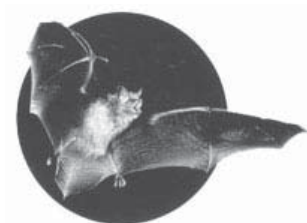
Pada umumnya, bunyi memiliki tiga sifat, yaitu tinggi rendah bunyi, kuat lemah bunyi, dan warna bunyi. Tinggi rendah bunyi adalah kondisi gelombang bunyi yang diterima oleh telinga manusia berdasarkan frekuensi (jumlah getaran per detik). Tinggi suara (*pitch*) menunjukkan sifat bunyi yang mencirikan ketinggian atau kerendahannya terhadap seorang pengamat. Sifat ini berhubungan dengan frekuensi, namun tidak sama. Kekerasan bunyi juga memengaruhi titi nada. Hingga 1.000 Hz, meningkatnya kekerasan mengakibatkan turunnya titi nada.

Gelombang bunyi dibatasi oleh jangkauan frekuensi yang dapat merangsang telinga dan otak manusia kepada sensasi pendengaran. Jangkauan ini adalah 20 Hz sampai 20.000 Hz, di mana telinga manusia normal mampu mendengar suatu bunyi. Jangkauan frekuensi ini disebut **audiosonik**. Sebuah gelombang bunyi yang memiliki frekuensi di bawah 20 Hz dinamakan sebuah **gelombang infrasonik**. Sementara itu, bunyi yang memiliki frekuensi di atas 20.000 Hz disebut **ultrasonik**.

Banyak hewan yang dapat mendengar bunyi yang frekuensinya di atas 20.000 Hz. Misalnya, kelelawar dapat mendeteksi bunyi yang frekuensinya sampai 100.000 Hz, dan anjing dapat mendengar bunyi setinggi 50.000 Hz. Kelelawar menggunakan ultrasonik sebagai alat penyuar gema untuk terbang dan berburu. Kelelawar mengeluarkan decitan yang sangat tinggi dan menggunakan telinganya yang besar untuk menangkap mangsanya. Gema itu memberitahu kelelawar mengenai lokasi mangsanya atau rintangan di depannya (misalnya pohon atau dinding gua).

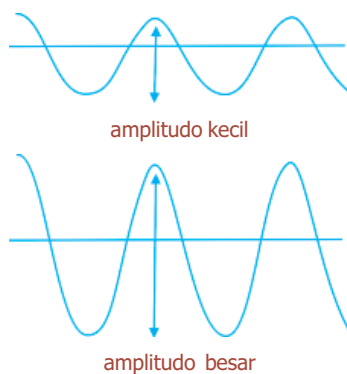


Gambar 3.3 Tinggi rendah bunyi dipengaruhi frekuensi: (a) frekuensi tinggi (b) frekuensi rendah.



Sumber: *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar*, PT Ichtiar Baru van Hoeve, 2005

Gambar 3.4 Kelelawar mampu mendengarkan bunyi ultrasonik.



Gambar 3.5 Kuat lemah bunyi dipengaruhi amplitudo:
(a) amplitudo kecil,
(b) amplitudo besar.

Kuat lemah atau intensitas bunyi adalah kondisi gelombang bunyi yang diterima oleh telinga manusia berdasarkan amplitudo dari gelombang tersebut. **Amplitudo** adalah simpangan maksimum, yaitu simpangan terjauh gelombang dari titik setimbangnya. **Intensitas** menunjukkan sejauh mana bunyi dapat terdengar. Jika intensitasnya kecil, bunyi akan melemah dan tidak dapat terdengar. Namun, apabila intensitasnya besar, bunyi menjadi semakin kuat, sehingga berbahaya bagi alat pendengaran.

Untuk mengetahui hubungan antara amplitudo dan kuat nada, dapat diketahui dengan melakukan percobaan menggunakan garputala. Garputala dipukulkan ke meja dengan dua pukulan yang berbeda, akan dihasilkan yaitu pukulan yang keras menghasilkan bunyi yang lebih kuat. Hal ini menunjukkan bahwa amplitudo getaran yang terjadi lebih besar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kuat lemahnya nada atau bunyi bergantung pada besar kecilnya amplitudo. Semakin besar amplitudo getaran, maka semakin kuat pula bunyi yang dihasilkan.

Warna bunyi adalah bunyi yang diterima oleh alat pendengaran berdasarkan sumber getarannya. Sumber getaran yang berbeda akan menghasilkan bentuk gelombang bunyi yang berbeda pula. Hal ini menyebabkan nada yang sama dari dua sumber getaran yang berbeda pada telinga manusia.



C. Efek Doppler



Menurut Doppler gelombang bunyi dari sumber yang bergerak mendekat mengalami tekanan yang memberinya nada atau frekuensi yang lebih tinggi. Sementara gelombang bunyi dari benda yang menjauh menjadi regang sehingga nadanya menjadi rendah.

Perubahan frekuensi gerak gelombang yang disebabkan gerak relatif antara sumber dan pengamat disebut sebagai *efek Doppler*, yang diusulkan seorang fisikawan Austria, Christian Johann Doppler (1803 - 1853). Peristiwa ini dapat ditemukan pada gelombang bunyi. Jika sebuah sumber dan pengamat sama-sama bergerak saling mendekat, maka frekuensi yang terdengar akan lebih tinggi dari frekuensi yang dihasilkan sumber. Sebaliknya, jika keduanya bergerak saling menjauh, maka frekuensi yang terdengar akan lebih rendah. Sebagai contoh, sebuah sepeda motor bergerak mendekati pengamat, maka suara putaran mesin akan terdengar lebih keras. Tetapi, jika sepeda motor menjauh, perlahan-lahan suara putaran mesin tidak terdengar.

Frekuensi (f) dari bunyi yang dihasilkan sebagai akibat gerak relatif dari sumber dan pengamat dinyatakan oleh:

$$f_p = \left(\frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \right) f_s \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan:

f_p = frekuensi bunyi yang terdengar (Hz)

v = cepat rambat (m/s)

v_p = kecepatan pendengar (m/s)

v_s = kecepatan sumber bunyi (m/s)

f_s = frekuensi sumber bunyi (Hz)

tanda (+) untuk pendengar mendekati sumber bunyi atau sumber bunyi menjauhi pendengar

tanda (-) untuk pendengar menjauhi sumber bunyi atau sumber bunyi mendekati pendengar



Sumber: *Ensiklopedia Iptek untuk Anak, Pelajar, & Umum*, PT Lentera Abadi, 2005

Gambar 3.6 (a) Suara sepeda motor yang bergerak mendekat terdengar lebih keras, (b) suara sepeda motor yang bergerak menjauh terdengar lebih pelan.

Contoh Soal

Seorang pengemudi mobil mengendarai mobilnya pada 20 m/s mendekati sebuah sumber bunyi 600 Hz yang diam. Berapakah frekuensi yang terdeteksi oleh pengemudi sebelum dan sesudah melewati sumber bunyi tersebut jika kecepatan bunyi di udara 340 m/s?

Penyelesaian:

Diketahui: $v_p = 20$ Hz

$v_s = 0$ m/s

$f_s = 600$ Hz

$v = 340$ m/s

Ditanya: a. f_p sebelum = ... ?

b. f_p sesudah = ... ?

Jawab:

a. Sebelum melewati sumber bunyi

$$f_p = \left(\frac{v + v_p}{v - v_s} \right) f_s = \left(\frac{340 + 20}{340 - 0} \right) 600 = \left(\frac{360}{340} \right) 600 = 635,3 \text{ Hz}$$

b. Sesudah melewati sumber bunyi

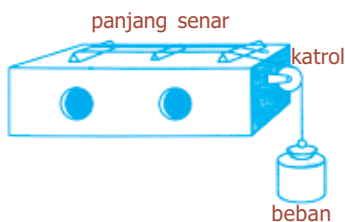
$$f_p = \left(\frac{v - v_p}{v + v_s} \right) f_s = \left(\frac{340 - 20}{340 + 0} \right) 600 = \left(\frac{320}{340} \right) 600 = 564,7 \text{ Hz}$$

Uji Kemampuan 3.1

Klakson sebuah mobil mempunyai frekuensi 400 Hz. Berapakah frekuensi yang terdeteksi jika mobil bergerak melalui udara terang menuju penerima diam dengan laju 30 m/s?



Cepat Rambat Gelombang



Sumber: *Kamus Fisika Bergambar*,
Pakar Raya, 2004

Gambar 3.7 Sonometer untuk menyelidiki cepat rambat gelombang transversal pada dawai.

1. Cepat Rambat Gelombang Transversal pada Dawai

Cepat rambat gelombang transversal pada dawai atau kawat, diselidiki menggunakan sebuah alat yang disebut **sonometer**. Sonometer merupakan sebuah piranti yang terdiri atas kotak kosong berlubang dengan kawat yang ditegangkan di atasnya. Satu ujung diikatkan, ujung yang lain dilewatkan katrol yang pada ujungnya diberi beban untuk memberi tegangan kawat. Jika kawat digetarkan, maka nada yang dihasilkan dapat ditala dengan garputala. Dengan cara ini, efek dari panjang dan tegangan kawat dapat diselidiki. Frekuensi (f) yang dihasilkan dinyatakan dengan persamaan:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \dots\dots\dots (3.2)$$

dengan:

f = frekuensi (Hz)

l = panjang kawat atau dawai (m)

F = tegangan kawat atau beban (N)

μ = massa kawat per satuan panjang (kg/m)

2. Cepat Rambat Bunyi

Bunyi merupakan getaran yang dapat ditransmisikan oleh air, atau material lain sebagai medium (perantara). Bunyi merupakan gelombang longitudinal dan ditandai dengan frekuensi, intensitas (*loudness*), dan kualitas. Kecepatan bunyi bergantung pada transmisi oleh mediumnya.

a. Cepat Rambat Bunyi pada Zat Padat

Modulus elastisitas atau modulus Young adalah perbandingan antara tegangan (*stress*) dengan regangan (*strain*) dari suatu benda.



Thomas Young, ahli fisika sekaligus dokter menemukan teori gelombang, akomodasi mata, astigmatisme, hukum interferensi cahaya, dan berbagai penemuan lain.

Gelombang bunyi yang merambat dalam medium zat padat memiliki cepat rambat yang besarnya dipengaruhi oleh modulus Young dan massa jenis zat, yang dirumuskan:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (3.3)$$

dengan E adalah *modulus Young* (N/m²) dan ρ menyatakan massa jenis zat padat (kg/m³).

b. Cepat Rambat Bunyi pada Zat Cair

Laju gelombang bunyi dalam suatu medium yang memiliki modulus curah B (*bulk modulus*) dan rapat massa dinyatakan oleh persamaan:

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \dots\dots\dots (3.4)$$

dengan ρ adalah massa jenis zat cair, dan β adalah *modulus curah*, yang menyatakan perbandingan tekanan pada sebuah benda terhadap fraksi penurunan volume (N/m²).

c. Cepat Rambat Bunyi pada Gas

Kecepatan bunyi untuk gas, nilai E yang memengaruhi cepat rambat bunyi pada zat padat setara dengan modulus bulk adiabatik, yaitu:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \dots\dots\dots (3.5)$$

dengan P adalah tekanan gas dan γ adalah nisbah kapasitas terminal molar. Ini setara dengan:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \dots\dots\dots (3.6)$$

dengan:


R = tetapan molar gas (J/mol K)

M = massa satu mol gas

T = suhu termodinamika (K)

v = cepat rambat bunyi (m/s)

Sementara itu, γ merupakan konstanta yang bergantung pada jenis gas, untuk udara mempunyai nilai 1,4.



Komet
Kolom mengingat

Kecepatan bunyi tergantung pada transmisi oleh mediumnya.

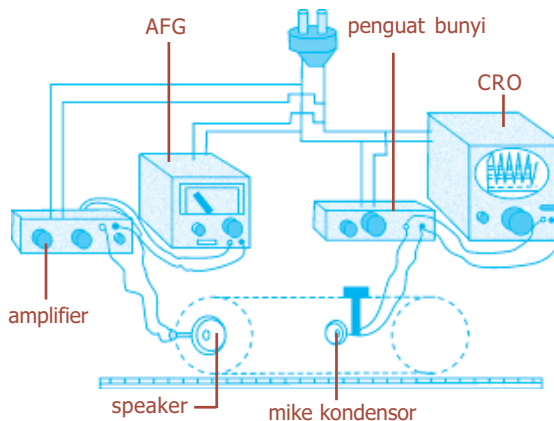
1. Cepat rambat bunyi pada zat padat $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
2. Cepat rambat bunyi pada zat cair $v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}$
3. cepat rambat bunyi pada gas $v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$

Kegiatan

Tujuan : Melakukan pengukuran kecepatan bunyi pada berbagai zat alir.
 Alat dan bahan : Amplifier penimbul bunyi, *Audio Frequency Generator* (AFG), instrumen penangkap bunyi, *Cathode Ray Oscilloscope* (CRO), mike kondensor, ruang bunyi, medium alir dan wadahnya.

Cara Kerja:

1. Rangkailah percobaan sesuai dengan gambar di samping.
2. Pasanglah amplifier dan AFG pada posisi *on*, dan atur AFG dengan suatu frekuensi terpilih yang menimbulkan bunyi pada amplifier.
3. Pasanglah sistem penangkap bunyi dan CRO pada posisi *on*. Amati apakah bunyi tertangkap oleh sistem dengan melihat perubahan pulsa CRO.



Bila tertangkap berarti sistem percobaan baik, dan bila tidak lihatlah mungkin ada bagian yang tidak terhubung.

4. Masukkan medium air yang akan diteliti ke dalam wadah bunyi, dan mike kondensor yang terlindung ke dalam medium itu.
5. Gerakkan mike kondensor, dan lihatlah perubahan tinggi pulsa yang terjadi pada CRO. Ketika diperoleh pulsa tertinggi pertama catat letaknya sesuai penggaris yang tersedia. Demikian juga ketika terjadi pada pulsa tertinggi kedua, ketiga, dan seterusnya.
6. Ukurlah jarak antara pulsa pertama dengan pulsa ketiga, dan inilah panjang gelombang bunyi pada medium yang diteliti (λ_m) pada frekuensi yang digunakan yaitu f_m .
7. Sesuai dengan hubungan $v = f \cdot \lambda$, maka kecepatan bunyi pada medium itu dapat ditentukan.
8. Ulangi percobaan untuk penggunaan frekuensi yang berbeda.
9. Ulangi percobaan untuk berbagai medium yang berbeda.

Diskusi:

1. Bagaimana kecepatan bunyi pada tiap medium yang digunakan?
2. Apa yang dapat disimpulkan dari percobaan ini?

Uji Kemampuan 3.2

- Jika diketahui $\gamma = 1,4$; $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$; dan $M = 2,9 \times 10^{-4} \text{ kg/mol}$, hitunglah laju bunyi di udara pada suhu:
 - 273 K,
 - 333 K, dan
 - 373 K!
- Gas helium dengan konstanta M sebesar $4 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ dan $\gamma = 1,67$ berada pada suhu 30°C . Tentukan cepat rambat bunyi pada suhu tersebut!



E. Sumber Bunyi

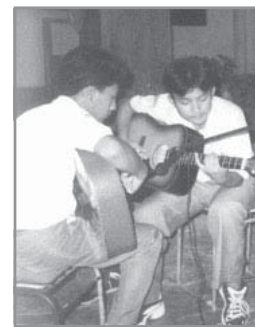
Setiap bunyi yang kita dengar dihasilkan oleh suatu benda yang bergetar. Benda yang bergetar tersebut disebut sumber bunyi. Piano, biola, dan instrumen yang dipergunakan dalam suatu orkes musik merupakan beberapa contoh benda-benda yang bertindak sebagai sumber bunyi. Bunyi yang dihasilkan bergantung pada mekanisme yang dipergunakan untuk membangkitkan bunyi. Getaran yang timbul dalam musik mungkin dihasilkan oleh gesekan, petikan, atau dengan meniupkan udara ke dalam instrumen tersebut. Biola, gitar, dan piano menggunakan senar yang bergetar untuk menghasilkan bunyi. Sementara itu, terompet, seruling, dan flute menggunakan kolom udara yang bergetar.

Gambar 3.9 menunjukkan gelombang berdiri yang dihasilkan pada senar, yang menjadi dasar untuk semua alat petik. Frekuensi dasar atau frekuensi resonan paling rendah ditunjukkan dengan simpul tertutup yang terdapat pada kedua ujungnya. Panjang gelombang nada dasar pada senar adalah dua kali panjang senar tersebut, sehingga frekuensi dasarnya adalah:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} \dots\dots\dots (3.7)$$

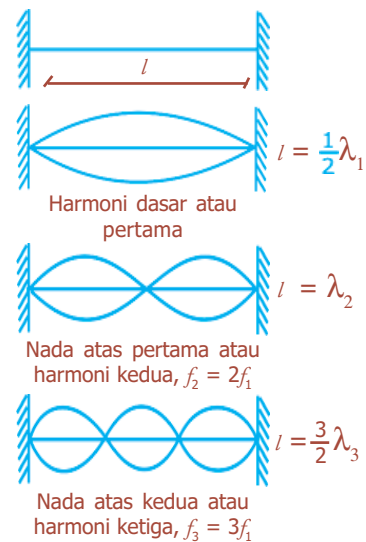
dengan v adalah kecepatan gelombang pada senar.

Getaran yang dihasilkan senar tidak menghasilkan bunyi yang cukup keras karena senar terlalu tipis untuk menekan dan meregangkan banyak udara, maka diperlukan sejenis penguat mekanis untuk memperluas bidang permukaan yang bersentuhan dengan udara,



Sumber: *Gerbang*, Juli 2006

Gambar 3.8 Getaran dari senar gitar yang dipetik.



Gambar 3.9 Gelombang berdiri pada senar.

sehingga dihasilkan bunyi yang lebih kuat. Sebagai contoh adanya kotak bunyi pada gitar dan biola, atau papan bunyi pada piano.

Panjang tali berhubungan dengan setengah panjang gelombang ($\frac{1}{2}\lambda$), dengan λ adalah panjang gelombang dasar. Ketika frekuensi sama dengan kelipatan bilangan bulat dari dasar, merupakan frekuensi alami yang disebut nada atas. Frekuensi ini disebut juga harmoni, yang frekuensi dasarnya disebut harmoni pertama.

Harmoni kedua adalah mode berikutnya setelah dasar memiliki dua loop. Panjang tali l berhubungan dengan satu panjang gelombang atau dituliskan $l = \lambda_2$. Untuk

harmonik ketiga adalah $l = \frac{3}{2}\lambda_3$, harmonik keempat $l = 2\lambda_4$, dan seterusnya, yang dapat dinyatakan:

$$l = \frac{n\lambda_n}{2} \dots\dots\dots (3.8)$$

dengan n adalah bilangan bulat yang menunjukkan indeks harmoni, sehingga λ_n dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\lambda_n = \frac{2l}{n} \dots\dots\dots (3.9)$$

Untuk menentukan frekuensi f di setiap getaran, dapat diketahui dengan menggunakan hubungan $f = \frac{v}{\lambda}$, sehingga diperoleh persamaan:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n \cdot v}{2l} = n \cdot f_1 \dots\dots\dots (3.10)$$

dengan f_1 adalah frekuensi dasar yang besarnya adalah:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2l}$$

Alat yang menggunakan kolom udara sebagai sumber bunyi disebut *pipa organa*. Alat musik tiup dan pipa organa menghasilkan bunyi dari getaran gelombang berdiri di kolom udara dalam tabung atau pipa, seperti tampak pada Gambar 3.10. Pada beberapa alat musik tiup, bibir pemain yang bergetar membantu menggetarkan kolom udara. Sementara itu, pada instrumen buluh, seperti klarinet dan saksofon, kolom udara dibangkitkan oleh suatu buluh yang terbuat dari bambu atau bahan lenting lainnya yang dapat digerakkan oleh hembusan napas pemainnya. Kolom udara bergetar pada kecepatan tetap yang ditentukan oleh panjang buluh. Panjang kolom udara yang efektif dapat diubah dengan membuka dan menutup sisi lubang dalam pipa.



Sumber: *Gerbang*, Mei 2003

Gambar 3.10 Kolom udara pada alat musik tiup.

Pipa organa dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.

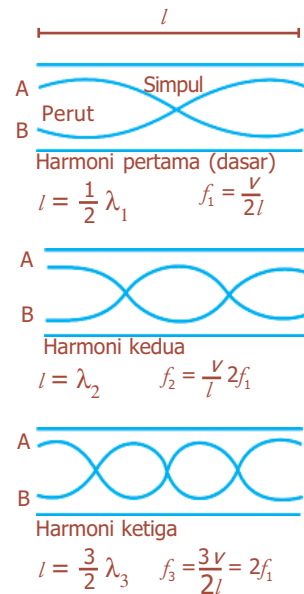
1. Pipa Organa Terbuka

Tabung yang terbuka di kedua ujungnya pada sebuah alat musik tiup disebut pipa organa terbuka. Secara grafis, ditunjukkan pada Gambar 3.11. Gambar tersebut menunjukkan tabung terbuka yang memiliki simpul terbuka simpangan di kedua ujungnya. Paling tidak terdapat satu simpul tertutup agar terjadi gelombang berdiri di dalam pipa organa. Satu simpul tertutup berhubungan dengan frekuensi dasar tabung. Jarak antara dua simpul tertutup atau terbuka adalah setengah panjang gelombang, yaitu: $l = \frac{1}{2}\lambda$ atau $\lambda = 2l$. Jadi, frekuensi dasar adalah:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} \dots\dots\dots (3.11)$$

dengan v adalah kecepatan bunyi di udara.

Gelombang berdiri dengan dua simpul tertutup merupakan nada tambahan pertama atau harmoni kedua dan jaraknya setengah panjang gelombang dan dua kali lipat frekuensi.



Gambar 3.11 Gelombang berdiri pada pipa organa terbuka.

Contoh Soal

Sebuah pipa panjangnya 2,5 m. Tentukan tiga frekuensi harmonik terendah jika pipa terbuka pada kedua ujungnya ($v = 350$ m/s)!

Penyelesaian:

Diketahui: $l = 2,5$ m;
 $v = 350$ m/s

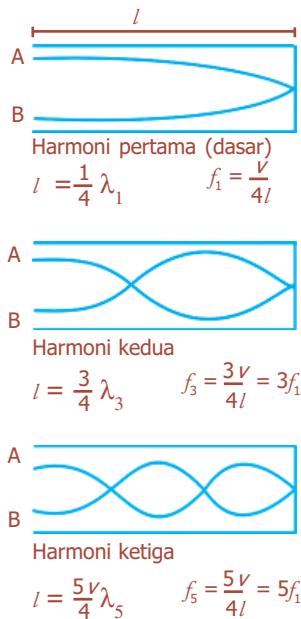
Ditanya: $f_0 = \dots ?$
 $f_1 = \dots ?$
 $f_2 = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{v}{2l} \\ &= \frac{350}{2(2,5)} \\ &= \frac{350}{5} \\ &= 70 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$f_1 = 2f_0 = 2 \times 70 = 140 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 3f_0 = 3 \times 70 = 210 \text{ Hz}$$



Gambar 3.12 Gelombang berdiri pada pipa organa tertutup.

2. Pipa Organa Tertutup

Pada tabung tertutup, tampak pada Gambar 3.12, menunjukkan bahwa selalu ada simpangan simpul tertutup di ujung tertutup, karena udara tidak bebas bergerak, dan simpul terbuka di ujung terbuka (di mana udara dapat bergerak bebas). Jarak antara simpul tertutup dan terbuka terdekat adalah $\frac{1}{4}\lambda$, maka frekuensi dasar pada tabung hanya berhubungan dengan seperempat panjang gelombang di dalam tabung, yaitu:

$$l = \frac{\lambda}{4} \text{ atau } \lambda = 4l$$

Frekuensi dasar pipa organa dirumuskan:

$$f_1 = \frac{v}{4l} \dots\dots\dots (3.12)$$

Pada pipa organa tertutup, hanya harmoni ganjil saja yang ada. Nada tambahan mempunyai frekuensi 3, 5, 7, ... kali frekuensi dasar. Gelombang dengan frekuensi kelipatan genap dari frekuensi dasar tidak mungkin memiliki simpul tertutup di satu ujung dan simpul terbuka di ujung yang lain.

Contoh Soal

Sebuah pipa organa tertutup panjangnya 60 cm. Jika cepat rambat bunyi 340 m/s, tentukan frekuensi nada dasar, harmoni ketiga, dan harmoni kelima pada pipa organa tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $l = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$
 $v = 340 \text{ m/s}$

Ditanya: $f_1 = \dots?$
 $f_3 = \dots?$
 $f_5 = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{v}{4l} \\ &= \frac{340}{(4)(6 \times 10^{-1})} \\ &= \frac{3400}{24} \\ &= 141,7 \text{ Hz} \\ f_3 &= 3f_1 = 3 (141,7) = 425,1 \text{ Hz} \\ f_5 &= 5f_1 = 5 (141,7) = 708,5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Percikan Fisika

Suara Biola



Busur penggesek biola terdiri atas rambut-rambut ekor kuda yang diregang dengan rangka kayu ringan. Rambut-rambut ini dilapisi dengan bahan kering dan lengket yang disebut *rosin* (damar). Ketika busur menggesek, dawai ikut tertarik ke salah satu sisi. Dawai menegang dan tiba-tiba tergelincir lepas dari busur, yang mengakibatkan dawai menggetar dan “menata diri” kembali ke posisi lurus. Kemudian, dawai akan melekat kembali ke rambut busur dan ikut tertarik ke sisi tertentu. Proses penarikan dan penggelinciran ini berulang sangat cepat sehingga menyebabkan dawai berosilasi maju-mundur pada frekuensi getaran alaminya (frekuensi resonansi).

Uji Kemampuan 3.3

Jika laju bunyi 200 m/s, berapakah frekuensi dan panjang gelombang yang mungkin untuk gelombang bunyi berdiri pada pipa organa tertutup sepanjang 2 m?



F. Energi dan Intensitas Gelombang

Gelombang dapat merambat dari satu tempat ke tempat lain melalui medium yang bermacam-macam. Gelombang dapat merambatkan energi. Dengan demikian, gelombang mempunyai energi. Jika udara atau gas dilalui gelombang bunyi, partikel-partikel udara akan bergetar sehingga setiap partikel akan mempunyai energi sebesar:

$$E = \frac{1}{2}kA^2, \text{ dengan } k = \text{tetapan}, A = \text{amplitudo}$$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = 2\pi^2mf^2 A^2$$

dengan:

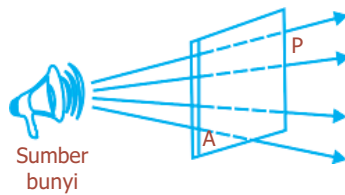
E = energi gelombang (J)

ω = frekuensi sudut (rad/s)

k = konstanta (N/m)

f = frekuensi (Hz)

A = amplitudo (m)



Gambar 3.13 Daya bunyi yang menembus luas permukaan bidang.

1. Intensitas Gelombang Bunyi

Intensitas bunyi menyatakan energi bunyi tiap detik (daya bunyi) yang menembus bidang setiap satuan luas permukaan secara tegak lurus, dirumuskan dalam persamaan:

$$I = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (3.13)$$

dengan I adalah intensitas bunyi (watt/m^2), A adalah luas bidang permukaan (m^2), dan P menyatakan daya bunyi (watt).

2. Taraf Intensitas Bunyi

Intensitas gelombang bunyi yang dapat didengar manusia rata-rata $10^{-12} \text{ watt/m}^2$, yang disebut **ambang pendengaran**. Sementara itu, intensitas terbesar bunyi yang masih terdengar oleh manusia tanpa menimbulkan rasa sakit adalah 1 watt/m^2 , yang disebut **ambang perasaan**. Hal itu menyebabkan selang intensitas bunyi yang dapat merangsang pendengaran itu besar, yaitu antara $10^{-12} \text{ watt/m}^2$ sampai 1 watt/m^2 . Oleh karena itu, untuk mengetahui taraf intensitas (TI) bunyi, yaitu perbandingan antara intensitas bunyi dengan harga ambang pendengaran, digunakan skala logaritma, yang dirumuskan dalam persamaan:

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0} \dots\dots\dots (3.14)$$

dengan TI menyatakan taraf intensitas bunyi (dB), I_0 adalah harga ambang intensitas bunyi (10 watt/m^2), dan I adalah intensitas bunyi (watt/m^2).

Besaran TI tidak berdimensi dan mempunyai satuan bel, atau jauh lebih umum desibel (dB), yang besarnya $\frac{1}{10}$ bel ($1 \text{ bel} = 10 \text{ dB}$).

Taraf intensitas inilah yang memengaruhi kenyaringan bunyi. Tabel 3.2 menunjukkan intensitas dan taraf intensitas pada sejumlah bunyi.

Tabel 3.2 Intensitas berbagai macam bunyi

Sumber Bunyi	Tingkat Intensitas (dB)	Intensitas (W/m^2)
Pesawat jet pada jarak 30 m	140	100
Ambang rasa sakit	120	1
Konser rock yang keras dalam ruangan	120	1
Sirine pada jarak 30 m	100	1×10^{-2}

Interior mobil, yang melaju pada 50 km/jam	75	3×10^{-5}
Lalu lintas jalan raya yang sibuk	70	1×10^{-5}
Percakapan biasa, dengan jarak 50 cm	65	3×10^{-6}
Radio yang pelan	40	1×10^{-8}
Bisikan	20	1×10^{-10}
Gemerisik daun	10	1×10^{-11}
Batas pendengaran	0	1×10^{-12}

Contoh Soal

Sebuah motor melepas daya sekitar 3 W dalam arena balap. Jika daya ini terdistribusi secara seragam ke semua arah, berapakah intensitas bunyi pada jarak 20 m?

Penyelesaian:

Diketahui: $P = 3 \text{ W}$

$r = 20 \text{ m}$

Ditanya: $I = \dots ?$

Jawab:
$$I = \frac{P}{A} = \frac{3}{4\pi(20)^2} = 5,97 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

Uji Kemampuan 3.4

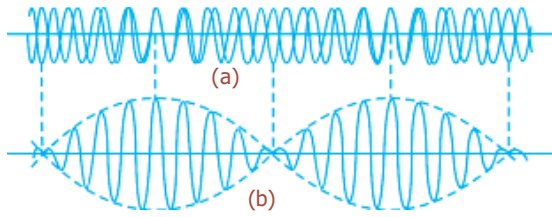
Seekor singa yang mengaum melepas daya sekitar 0,5 mW.

- Jika daya terdistribusi secara seragam ke semua arah, berapa tingkat intensitas bunyi pada jarak 10 m?
- Berapa tingkat intensitas dari dua anjing yang mengaum secara bersamaan jika masing-masing melepas daya 2 mW?



G. Pelayangan Bunyi

Pelayangan (*beats*) merupakan fenomena yang menerapkan prinsip interferensi gelombang. Pelayangan akan terjadi jika dua sumber bunyi menghasilkan frekuensi gelombang yang mempunyai beda frekuensi yang kecil. Kedua gelombang bunyi akan saling berinterferensi dan tingkat suara pada posisi tertentu naik dan turun secara bergantian. Peristiwa menurun atau meningkatnya kenyaringan secara berkala yang terdengar ketika dua nada dengan frekuensi yang sedikit berbeda dibunyikan pada saat yang bersamaan disebut **pelayangan**. Gelombang akan saling memperkuat dan memperlemah satu sama lain bergerak di dalam atau di luar dari fasenya.



Gambar 3.14 Fenomena pelayangan terjadi sebagai akibat superposisi dua gelombang bunyi dengan beda frekuensi yang kecil.

Gambar 3.14(a) menunjukkan pergeseran yang dihasilkan sebuah titik di dalam ruang di mana rambatan gelombang terjadi, dengan dua gelombang secara terpisah sebagai sebuah fungsi dari waktu. Kita anggap kedua gelombang tersebut mempunyai amplitudo sama. Pada Gambar 3.14(b) menunjukkan resultan getaran di titik tersebut sebagai fungsi dari waktu. Kita

dapat melihat bahwa amplitudo gelombang resultan di titik yang diberikan tersebut berubah terhadap waktu (tidak konstan). Pergeseran pada titik tersebut yang dihasilkan oleh sebuah gelombang dapat dinyatakan:

$$y_1 = A \cos 2\pi f_1 t \dots\dots\dots (3.15)$$

Sementara itu, pergeseran di titik tersebut yang dihasilkan gelombang lain dan amplitudo sama adalah:

$$y_2 = A \cos 2\pi f_2 t \dots\dots\dots (3.16)$$

Berdasarkan prinsip superposisi gelombang, maka pergeseran resultan adalah:

$$y = y_1 + y_2 = A(\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t)$$

Karena $\cos a + \cos b = 2 \cos \frac{a-b}{2} \cos \frac{a+b}{2}$, maka:

$$y = \left[2A \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \right] \cos 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t \dots\dots\dots (3.17)$$

sehingga getaran yang dihasilkan dapat ditinjau sebagai getaran yang mempunyai frekuensi:

$$\bar{f} = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

yang merupakan frekuensi rata-rata dari kedua gelombang tersebut dengan amplitudo yang berubah terhadap waktu dengan frekuensi:

$$f_{\text{amplitudo}} = \frac{f_1 - f_2}{2}$$

Jika f_1 dan f_2 adalah hampir sama, maka suku ini adalah kecil dan amplitudo akan berfluktuasi secara lambat. Sebuah pelayangan, yaitu sebuah maksimum amplitudo,

akan terjadi bila $\cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t$ sama dengan 1 atau -1.

Karena masing-masing nilai ini terjadi sekali di dalam setiap siklus, maka banyaknya pelayangan per detik adalah dua kali frekuensi amplitudo, yaitu:

$$\begin{aligned} f_{\text{pelayangan}} &= 2 \cdot f_{\text{amplitudo}} \\ &= 2 \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) \end{aligned}$$

$$f_{\text{pelayangan}} = f_1 - f_2 \dots \dots \dots (3.18)$$

Jadi, banyaknya pelayangan per detik setara dengan perbedaan frekuensi gelombang-gelombang komponen.

Contoh Soal

Dua buah garputala dengan frekuensi nada dasar 340 Hz masing-masing digerakkan relatif ke seorang pengamat yang diam. Garputala pertama dibawa lari menjauh dari pengamat, sedangkan garputala lainnya dibawa lari menuju pengamat dengan kelajuan yang sama. Pengamat mendengar layangan dengan frekuensi 5 Hz. Jika diketahui cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, berapakah kelajuan lari tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui: $v_p = 0$
 $v = 340 \text{ m/s}$
 $f_s = 340 \text{ Hz}$

Ditanya: $x = \dots ?$

Jawab: $x = \frac{2x}{v^2 - x^2} = \frac{3}{vf_s}$

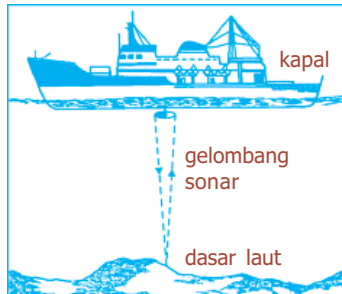
$$\begin{aligned} &= \frac{2x}{(340)^2 - x^2} = \frac{3}{340(340)} = 2x (340)^2 = 3(340)^2 - 3x^2 \\ &= 3x^2 + 2(340)^2x - 3(340)^2 = 0 \\ &= \left(x - \frac{3}{2}\right) (3x + 2(340)^2) = 0 \\ &= x - \frac{3}{2} = 0 \rightarrow x = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 3.5

Garputala dengan frekuensi 440 Hz dipukul secara bersamaan dengan dimainkannya nada A pada gitar, sehingga terdengar 3 layangan per sekon. Setelah senar gitar dikencangkan untuk menaikkan frekuensi, frekuensi layangan menjadi 6 layangan per sekon. Berapakah frekuensi senar gitar setelah dikencangkan?



Aplikasi Bunyi Ultrasonik



Sumber: *Sains Populer Cahaya Energi dan Gerak*, PT Remaja Rosdakarya, Bandung, 2005

Gambar 3.15 Kapal menggunakan sonar untuk mengukur kedalaman laut.

Gelombang ultrasonik banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang dalam kehidupan sehari-hari. Berikut ini beberapa contoh penerapan bunyi ultrasonik.

1. Sonar (Sound Navigation Ranging)

Sonar merupakan suatu teknik yang digunakan untuk menentukan letak benda di bawah laut dengan menggunakan metode pantulan gelombang. Pantulan gelombang oleh suatu permukaan atau benda sehingga jenis gelombang yang lebih lemah terdeteksi tidak lama setelah gelombang asal disebut gema. Gema merupakan bunyi yang terdengar tidak lama setelah bunyi asli. Perlambatan antara kedua gelombang menunjukkan jarak permukaan pemantul. Penduga gema (*echo sounder*) ialah peralatan yang digunakan untuk menentukan kedalaman air di bawah kapal. Kapal mengirimkan suatu gelombang bunyi dan mengukur waktu yang dibutuhkan gema untuk kembali, setelah pemantulan oleh dasar laut. Selain kedalaman laut, metode ini juga dapat digunakan untuk mengetahui lokasi karang, kapal karam, kapal selam, atau sekelompok ikan.

2. Pencitraan Medis

Bunyi ultrasonik digunakan dalam bidang kedokteran dengan menggunakan **teknik pulsa-gema**. Teknik ini hampir sama dengan sonar. Pulsa bunyi dengan frekuensi tinggi diarahkan ke tubuh, dan pantulannya dari batas atau pertemuan antara organ-organ dan struktur lainnya dan luka dalam tubuh kemudian dideteksi. Dengan menggunakan teknik ini, tumor dan pertumbuhan abnormal lainnya, atau gumpalan fluida dapat dilihat. Selain itu juga dapat digunakan untuk memeriksa kerja katup jantung dan perkembangan janin dalam kandungan. Informasi mengenai berbagai organ tubuh seperti otot, jantung, hati, dan ginjal bisa diketahui.

Frekuensi yang digunakan pada diagnosis dengan gelombang ultrasonik antara 1 sampai 10 MHz, laju gelombang bunyi pada jaringan tubuh manusia sekitar 1.540 m/s, sehingga panjang gelombangnya adalah:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{(1.540 \text{ m/s})}{(10^6 \text{ s}^{-1})} = 1,5 \times 10^{-3} = 1,5 \text{ mm.}$$



Sumber: *Jendela Iptek Kedokteran*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 3.16 Gelombang ultrasonik dimanfaatkan untuk melihat perkembangan janin dalam kandungan.

Panjang gelombang ini merupakan batas benda yang paling kecil yang dapat dideteksi. Makin tinggi frekuensi, makin banyak gelombang yang diserap tubuh, dan pantulan dari bagian yang lebih dalam dari tubuh akan hilang.

Pencitraan medis dengan menggunakan bunyi ultrasonik merupakan kemajuan yang penting dalam dunia kedokteran. Metode ini dapat menggantikan prosedur lain yang berisiko, menyakitkan, dan mahal. Cara ini dianggap tidak berbahaya.

3. Terapi Medis dengan Bunyi Ultrasonik

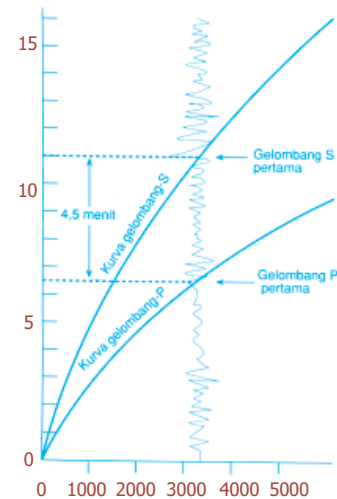
Dalam dunia kedokteran, gelombang ultrasonik digunakan dalam diagnosa dan pengobatan. Diagnosa dengan menggunakan gelombang ultrasonik berupa *USG* (ultrasonografi), dapat digunakan untuk mengetahui janin di dalam kandungan. Pengobatan meliputi penghancuran jaringan yang tidak diinginkan dalam tubuh, misalnya batu ginjal atau tumor, dengan menggunakan gelombang ultrasonik berintensitas tinggi (setinggi 10^7 W/m^2) yang kemudian difokuskan pada jaringan yang tidak diinginkan tersebut. Selain itu bunyi ultrasonik juga digunakan untuk terapi fisik, yaitu dengan memberikan pemanasan lokal pada otot yang cedera.

4. Dalam Dunia Industri

Dalam dunia industri, dengan menggunakan bor-bor ultrasonik dapat dibuat berbagai bentuk atau ukuran lubang pada gelas dan baja.

5. Mengetahui Keadaan Bagian Dalam Bumi

Pergeseran tiba-tiba segmen-segmen kerak bumi yang dibatasi zona patahan dapat menghasilkan gelombang seismik. Ini memungkinkan para ahli geologi dan geofisika untuk memperoleh pengetahuan tentang keadaan bagian dalam Bumi dan membantu mencari sumber bahan bakar fosil baru. Ada empat tipe gelombang seismik, yaitu gelombang badan P, gelombang badan S, gelombang permukaan Love, dan gelombang permukaan Rayleigh. Alat yang digunakan untuk mendeteksi gelombang-gelombang ini disebut **seismograf**, yang biasanya digunakan untuk mendeteksi adanya gempa bumi. Seperti semua gelombang, laju gelombang seismik bergantung pada sifat medium, rigiditas, ketegaran, dan kerapatan medium. Grafik waktu perjalanan dapat digunakan untuk menentukan jarak stasiun seismograf dari episenter gempa bumi.

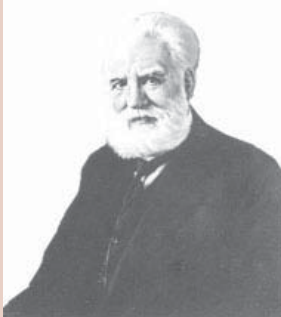


Sumber: *Fisika untuk Sains dan Teknik*
Jilid 1,
PT Erlangga, 1998

Gambar 3.17 Grafik waktu perjalanan dapat digunakan untuk menentukan jarak stasiun seismograf dari episenter gempa bumi.

Fiesta

Fisikawan Kita



Alexander Graham Bell

Seorang ilmuwan dan guru tunarungu asal Skotlandia yang lahir pada tanggal 3 Maret 1847 di Edinburgh dan meninggal di Baddeck Nova Scotia, Canada. Penemuannya yang terkenal yaitu telegraf ganda (1847), telepon (1876), fotofon (1880), dan piringan hitam (1886). Pada umumnya, hasil penemuan Bell merupakan bentuk pengabdian terhadap penderita tunarungu. Untuk menghormatinya, namanya digunakan sebagai satuan taraf intensitas bunyi yaitu decibel.

Kilas Balik

- ✧ Bunyi merupakan gelombang mekanik longitudinal.
- ✧ Tinggi rendahnya nada tergantung pada frekuensinya.
- ✧ Infrasonik, yaitu bunyi yang frekuensinya kurang dari 20 Hz.
- ✧ Ultrasonik, yaitu bunyi yang frekuensinya lebih dari 20.000 Hz.
- ✧ Kuat lemahnya bunyi tergantung pada amplitudonya.
- ✧ Efek Doppler mengacu pada perubahan frekuensi yang disebabkan gerak relatif antara sumber dan pengamat. Jika keduanya bergerak saling mendekat, maka frekuensi yang terdengar akan lebih tinggi, tetapi jika keduanya saling menjauh, frekuensi yang terdengar akan lebih rendah.
- ✧ Frekuensi gelombang pada dawai:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

- ✧ Cepat rambat bunyi pada zat padat:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E = Modulus Young

ρ = massa jenis zat padat

- ✧ Cepat rambat bunyi pada zat cair:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

B = Modulus Bulk

ρ = massa jenis zat cair

- * Cepat rambat bunyi pada gas

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$$

γ = nisbah kapasitas termal molar

R = tetapan molar gas umum

T = suhu termodinamika

M = massa satu mol gas

- * Senar yang terdapat pada alat petik berfungsi sebagai alat getar untuk menghasilkan bunyi. Frekuensi dasar atau frekuensi resonan paling rendah ditunjukkan dengan simpul tertutup yang terdapat pada kedua ujungnya. Frekuensi setiap harmoni (nada tambahan) merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar.
- * Pada alat musik tiup, gelombang berdiri dihasilkan pada kolom udara. Pada pipa organa terbuka memiliki simpul terbuka simpangan di kedua ujungnya. Frekuensi dasar tergantung pada panjang gelombang yang setara dengan dua kali panjang tabung. Harmoni mempunyai frekuensi yang besarnya 2, 3, 4,... kali lipat dari frekuensi dasar.
- * Pada pipa organa tertutup, frekuensi dasar pada tabung tergantung pada panjang gelombang yang setara dengan empat kali panjang tabung. Hanya harmoni ganjil yang terjadi, yang besarnya 3, 5, 7, ... kali frekuensi dasar.
- * Energi gelombang

$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

$$= \frac{1}{2}m\omega^2 A^2$$

$$= 2\pi mf^2 A^2$$

- * Intensitas bunyi merupakan perbandingan antara daya bunyi yang menembus bidang setiap satuan luas permukaan.
- * Taraf intensitas bunyi menyatakan perbandingan antara intensitas bunyi dan harga ambang pendengaran.

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- * Pelayangan merupakan peristiwa menurun atau meningkatnya kenyaringan secara berkala yang terdengar ketika dua bunyi dengan frekuensi yang sedikit berbeda dibunyikan pada saat yang bersamaan.
- * Gelombang ultrasonik banyak diterapkan pada berbagai bidang antara lain untuk mengukur kedalaman laut dengan teknik sonar, untuk pencitraan medis dengan teknik pulsa-gema, kemudian dapat pula digunakan untuk terapi medis, dan dimanfaatkan pula dalam bidang industri.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Gelombang bunyi adalah
 - a. gelombang transversal
 - b. gelombang longitudinal
 - c. gelombang elektromagnetik
 - d. gelombang yang dapat dipolarisasikan
 - e. gelombang yang dapat merambat dalam vakum
2. Nada bunyi akan terdengar lemah jika
 - a. frekuensinya tinggi
 - b. frekuensinya rendah
 - c. amplitudonya besar
 - d. amplitudonya kecil
 - e. periodenya tak beraturan
3. Tinggi rendahnya nada bergantung pada
 - a. kecepatan
 - b. pola getar
 - c. frekuensi
 - d. amplitudo
 - e. panjang gelombang
4. Kuat lemahnya nada/bunyi bergantung pada
 - a. amplitudo
 - b. panjang gelombang
 - c. frekuensi
 - d. kecepatan
 - e. pola getar
5. Dawai sepanjang 1 m diberi tegangan 100 N. Pada saat dawai digetarkan dengan frekuensi 500 Hz, di sepanjang dawai terbentuk 10 perut. Massa dawai tersebut adalah
 - a. 1 gram
 - b. 5 gram
 - c. 10 gram
 - d. 50 gram
 - e. 100 gram
6. Sebuah pipa organa tertutup memiliki panjang 0,8 m. Jika cepat rambat bunyi di udara adalah 320 ms^{-1} , maka dua frekuensi resonansi terendah yang dihasilkan oleh getaran udara di dalam pipa adalah
 - a. 100 Hz dan 200 Hz
 - b. 100 Hz dan 300 Hz
 - c. 200 Hz dan 400 Hz
 - d. 200 Hz dan 600 Hz
 - e. 400 Hz dan 800 Hz
7. Dua pipa organa terbuka A dan B ditiup bersama-sama. Pipa A menghasilkan nada dasar yang sama tinggi dengan nada atas kedua pipa B. Maka perbandingan panjang pipa organa A dengan pipa organa B adalah
 - a. 1 : 2
 - b. 1 : 3
 - c. 2 : 1
 - d. 2 : 3
 - e. 3 : 1

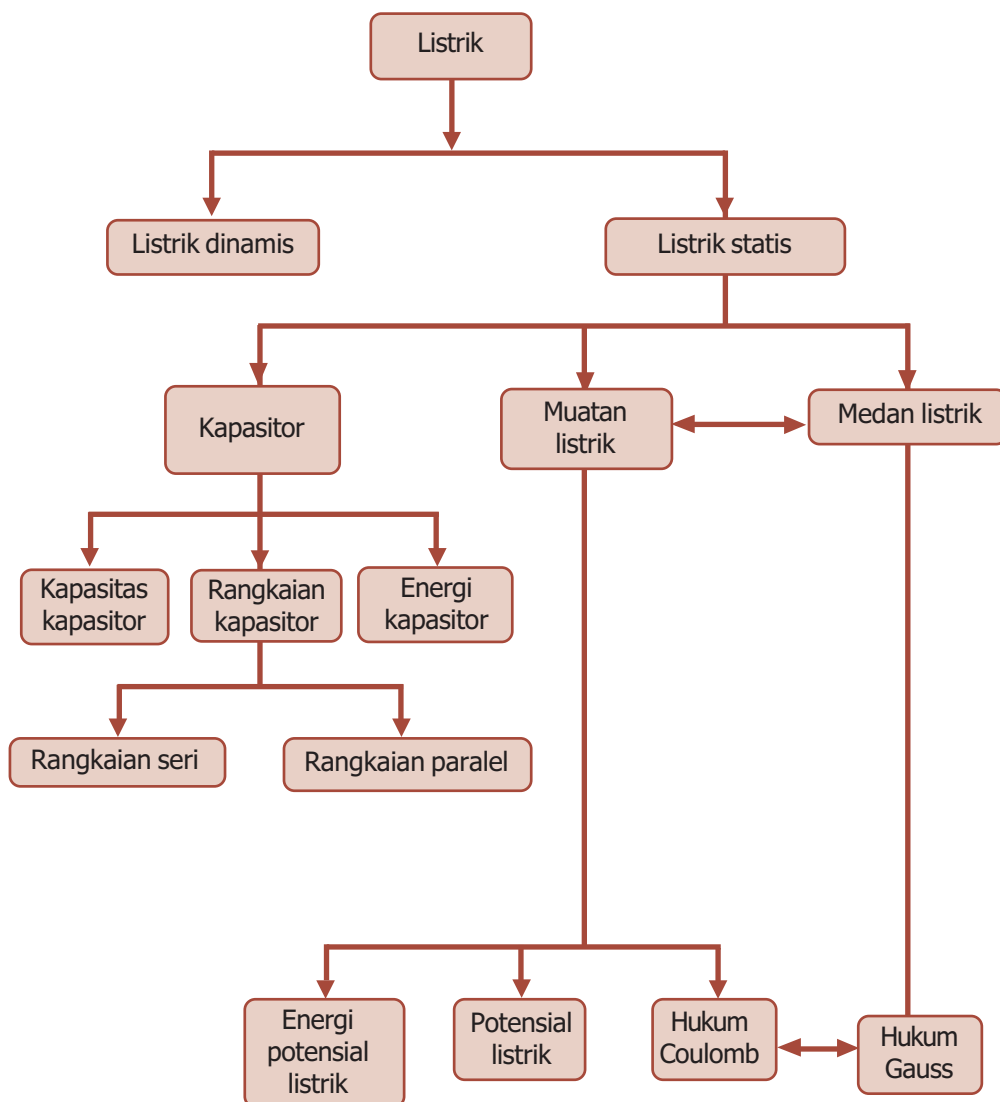
8. Seorang penerbang yang pesawat terbangnya mendekati menara bandara mendengar bunyi sirine menara dengan frekuensi 2.000 Hz. Jika sirine memancarkan bunyi dengan frekuensi 1.700 Hz, dan cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, maka kecepatan pesawat udara adalah
 - a. 236 km/jam
 - b. 220 km/jam
 - c. 216 km/jam
 - d. 200 km/jam
 - e. 196 km/jam
9. Sebuah sumber gelombang bunyi dengan daya 50 W memancarkan gelombang ke medium sekelilingnya yang homogen. Intensitas radiasi gelombang tersebut pada jarak 10 m dari sumber adalah
 - a. $4 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$
 - b. $4 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2$
 - c. $4 \times 10^1 \text{ W/m}^2$
 - d. $4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$
 - e. $2 \times 10^2 \text{ W/m}^2$
10. Taraf intensitas bunyi sebuah mesin rata-rata 50 dB. Apabila tiga mesin dihidupkan bersama, maka taraf intensitasnya adalah
 - a. 150 dB
 - b. 75 dB
 - c. 70 dB
 - d. 50 dB
 - e. 20 dB

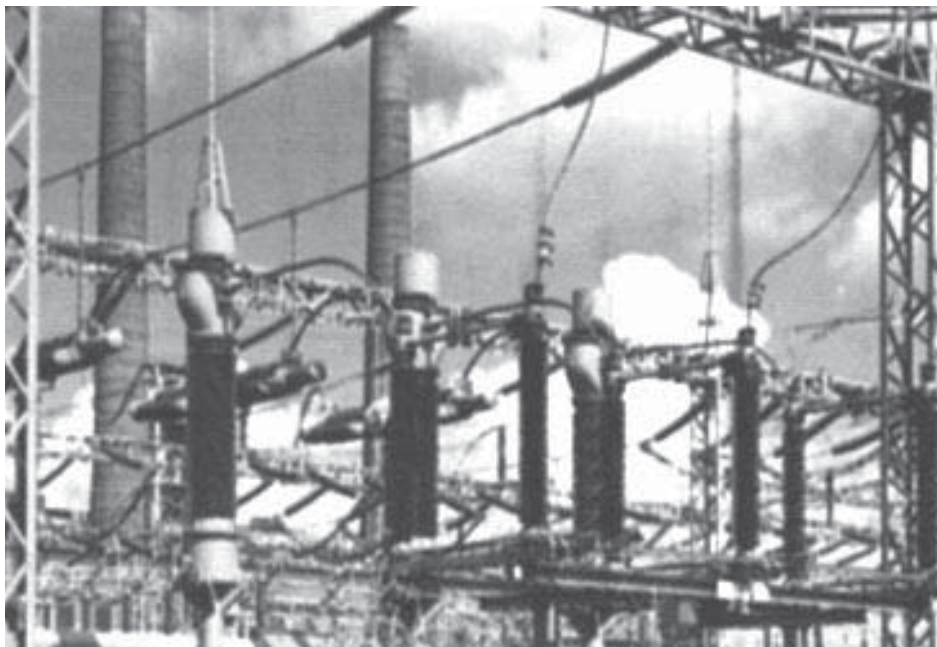
B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Sebuah senar gitar memiliki massa 2,0 gram dan panjang 60 cm. Jika cepat rambat gelombang sepanjang senar adalah 300 m/s, hitunglah gaya tegangan senar itu!
2. Seutas kawat baja yang massanya 5 gram dan panjang 1 m diberi tegangan 968 N. Tentukan:
 - a. cepat rambat gelombang transversal sepanjang kawat,
 - b. panjang gelombang dan frekuensi nada dasarnya,
 - c. frekuensi nada atas pertama dan kedua!
3. Sebuah sumber bunyi mempunyai taraf intensitas 6 dB. Bila 10 buah sumber bunyi yang sama berbunyi secara serentak, berapa taraf intensitas yang dihasilkan?
4. Kereta bergerak dengan laju 72 km/jam menuju stasiun sambil membunyikan peluit. Bunyi peluit kereta api tersebut terdengar oleh kepala stasiun dengan frekuensi 720 Hz. Jika laju bunyi di udara 340 m/s, berapa frekuensi peluit kereta api tersebut?
5. Dua garputala dengan frekuensi masing-masing 325 Hz dan 328 Hz digetarkan pada saat bersamaan. Berapa banyak layangan yang terdengar selama 5 sekon?

PETA KONSEP

Bab 4 LISTRIK STATIS





● Pusat pembangkit listrik.

Sumber: *Jendela Iptek Listrik*,
PT Balai Pustaka, 2000

Listrik adalah kebutuhan yang sangat mendasar. Setiap orang memerlukan listrik. Tahukah kalian bagaimana listrik ditemukan? Dan bagaimana listrik dapat dihasilkan? Sebelum mengetahui semua itu, kalian harus tahu mengenai sifat-sifat listrik, muatan dalam listrik, dan lain-lain. Nah, untuk lebih memahaminya ikuti uraian berikut ini.

Kata Kunci

fluks medan listrik,
kapasitor, listrik,
muatan listrik

Listrik merupakan salah satu bentuk energi. Energi listrik telah menjadi bagian penting dalam kehidupan manusia. Dengan adanya revolusi yang dilakukan oleh para ilmuwan pada akhir 1700-an, menimbulkan dampak adanya perubahan kehidupan manusia, yaitu saat ditemukannya suatu metode pemanfaatan daya listrik yang kuat. Dengan adanya revolusi tersebut, saat ini kita dapat menikmati berbagai teknologi karena hampir seluruh peralatan yang digunakan oleh manusia memanfaatkan bantuan energi listrik. Listrik pada dasarnya dibedakan menjadi dua macam, yaitu **listrik statis** dan **listrik dinamis**. Listrik statis berkaitan dengan muatan listrik dalam keadaan diam, sedangkan listrik dinamis berkaitan dengan muatan listrik dalam keadaan bergerak.



A. Listrik Statis dan Muatan Listrik



Sumber: *Jendela Iptek Listrik*,
PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 4.1 Batu ambar yang digosok pada wol dapat mengangkat bulu ayam.

BETA[®] Berita Fisika

Peristiwa munculnya muatan listrik pada dua buah benda yang netral karena saling digosokkan dinamakan elektrifikasi.

Kata listrik (*electricity*) berasal dari bahasa Yunani, *electron*, yang berarti "amber". Gejala listrik telah diselidiki sejak tahun 200 SM oleh Thales, seorang ahli filsafat dari Miletus, Yunani Kuno. Dia melakukan percobaan dengan menggosok-gosokkan batu amber pada sepotong kain wol atau bulu halus dan diletakkan di dekat benda ringan seperti bulu ayam. Ternyata bulu ayam tersebut akan terbang dan menempel di batu amber. Sehingga, dapat dikatakan bahwa batu amber menjadi bermuatan listrik. Batang kaca atau penggaris plastik yang digosok dengan kain juga akan menimbulkan efek yang sama seperti yang terjadi pada batu amber, yang sekarang kita sebut dengan istilah listrik statis. Muatan listrik statis dapat dihasilkan dengan menggosok-gosokkan balon ke suatu benda, misalnya kain. Perlu diingat bahwa semua benda terbuat dari atom, di mana setiap atom biasanya memiliki jumlah elektron dan proton yang sama. Muatan listrik positif proton dan muatan negatif elektron saling menetralkan. Tapi, jika keseimbangan ini terganggu, benda menjadi bermuatan listrik. Pada kasus balon, jika balon digosok dengan kain, elektron dipindahkan dari atom-atom kain ke atom-atom balon. Balon menjadi bermuatan negatif, dan kain yang kehilangan elektron menjadi bermuatan positif. Muatan tidak sejenis selalu tarik-menarik. Jadi, kain menempel ke balon.



B. Hukum Coulomb

Pada tahun 1785, seorang ahli fisika Prancis bernama Charles Augustin de Coulomb melakukan penelitian mengenai gaya yang ditimbulkan oleh dua benda yang bermuatan listrik. Coulomb menyatakan bahwa besar gaya listrik berbanding lurus dengan perkalian besar kedua muatannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda. Teori ini disebut *Hukum Coulomb*. Gaya tarik dan gaya tolak antara dua muatan listrik dinamakan gaya Coulomb, yang besarnya dapat ditentukan dalam persamaan:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \dots\dots\dots (4.1)$$

dengan k adalah konstanta pembanding, yaitu:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

Satuan gaya listrik menurut SI adalah newton (N). Satu newton (1 N) adalah sebanding dengan muatan yang dipindahkan oleh arus satu ampere dalam satu detik.

1. Muatan-Muatan yang Segaris

Besarnya gaya Coulomb pada suatu muatan yang dipengaruhi oleh beberapa muatan yang sejenis langsung dijumlahkan secara vektor.

Pada Gambar 4.3, gaya Coulomb pada muatan q_1 dipengaruhi oleh muatan q_2 dan q_3 adalah $F = F_{12} + F_{13}$. Apabila arah ke kanan dianggap positif dan arah ke kiri negatif, besar gaya Coulomb pada muatan:

$$F_1 = F_{12} + F_{13}$$

$$F_1 = \frac{kq_1 \cdot q_2}{r_{12}^2} - \frac{kq_1 \cdot q_3}{r_{13}^2}$$

Secara umum, gaya Coulomb dapat dirumuskan:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots\dots\dots (4.2)$$

2. Muatan-muatan yang Tidak Segaris

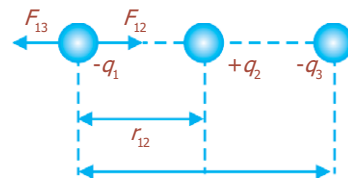
Tiga buah muatan q_1, q_2, q_3 ditunjukkan seperti pada Gambar 4.4. Untuk menentukan gaya Coulomb pada muatan q_1 dapat dicari dengan menggunakan rumus kosinus sebagai berikut.

$$F_1 = \sqrt{F_{12}^2 + F_{13}^2 + 2F_{12}F_{13}\cos\theta} \dots\dots\dots (4.3)$$

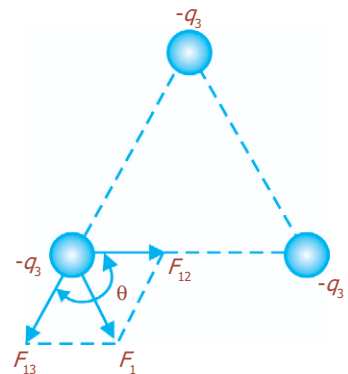
dengan $F_{12} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2}, F_{13} = k \frac{q_1 \cdot q_3}{r_{13}^2}$



Gambar 4.2 Hukum Coulomb, gaya antara dua muatan titik, q_1 dan q_2 berjarak r .



Gambar 4.3 Gaya elektrostatis tiga muatan.



Gambar 4.4 Gaya elektrostatis pada tiga muatan yang tidak segaris.

Contoh Soal

1. Dua titik A dan B berjarak 5 meter, masing-masing bermuatan listrik $+5 \times 10^{-4}$ C dan -2×10^{-4} C. Titik C terletak di antara A dan B berjarak 3 m dari A dan bermuatan listrik $+4 \times 10^{-5}$ C. Hitung besar gaya elektrostatis dari C!

Penyelesaian:

Diketahui: $q_A = +5 \times 10^{-4}$ C
 $q_B = -2 \times 10^{-4}$ C
 $q_C = +4 \times 10^{-5}$ C

Ditanya: $F_C = \dots?$

Jawab:

Muatan q_C ditolak q_A ke kanan karena sejenis,

misal, $F_{AC} = F_1$ dan ditarik muatan q_B ke kanan karena berlawanan

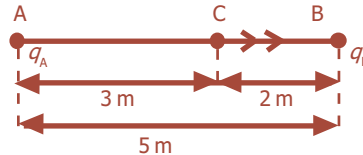
$$F_{CB} = F_2$$

Jadi, gaya elektrostatis total di C adalah:

$$F_C = F_1 + F_2 = k \frac{q_A \cdot q_C}{(AC)^2} + k \frac{q_C \cdot q_B}{(CB)^2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9)(5 \times 10^{-4})(4 \times 10^{-5})}{3^2} + \frac{(9 \times 10^9)(4 \times 10^{-5})(2 \times 10^{-4})}{2^2} = \frac{180}{9} + \frac{72}{4}$$

$$= 20 + 18 = 38 \text{ N ke kanan}$$



2. Diketahui segitiga ABC sama sisi dengan panjang sisi 3 dm. Pada titik sudut A dan B masing-masing terdapat muatan $+4 \mu\text{C}$ dan $-1,5 \mu\text{C}$, pada puncak C terdapat muatan $+2 \times 10^{-5}$ C. Hitunglah gaya elektrostatis total di puncak C!

Penyelesaian:

Diketahui: $q_A = 4 \mu\text{C} = 4 \times 10^{-6}$ C
 $q_B = -1,5 \mu\text{C} = -1,5 \times 10^{-6}$ C
 $q_C = 2 \times 10^{-5}$ C
 $a = 3 \text{ dm} = 3 \times 10^{-1}$ m

Ditanya: $F_C = \dots?$

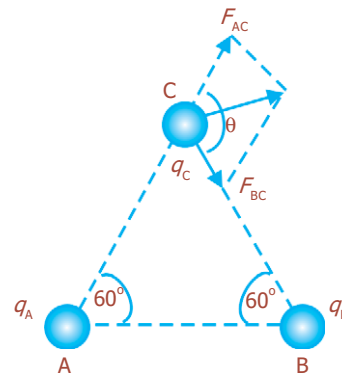
Jawab:

q_A dan q_C tolak-menolak dengan gaya F_1

$$F_1 = \frac{k \cdot q_A \cdot q_C}{r_{AC}^2} = \frac{(9 \times 10^9)(4 \times 10^{-6})(2 \times 10^{-5})}{(3 \times 10^{-1})^2} = \frac{72 \times 10^{-2}}{9 \times 10^{-2}} = 8 \text{ N}$$

q_B dan q_C tarik-menarik dengan gaya F_2

$$F_2 = \frac{k \cdot q_B \cdot q_C}{r_{BC}^2} = \frac{(9 \times 10^9)(1,5 \times 10^{-6})(2 \times 10^{-5})}{(3 \times 10^{-1})^2} = \frac{27 \times 10^{-2}}{9 \times 10^{-2}} = 3 \text{ N}$$



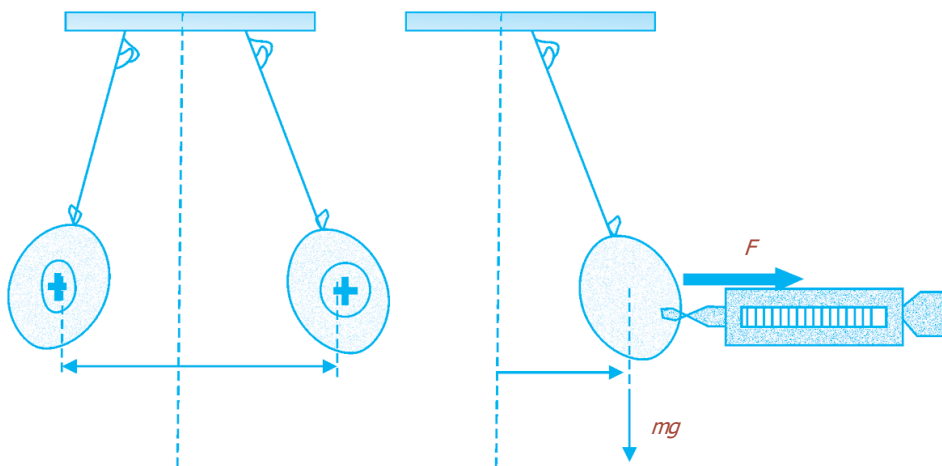
Jadi, gaya total di C adalah:

$$\begin{aligned}
 F &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \theta} = \sqrt{8^2 + 3^2 + 2(8)(3)\cos 120^\circ} \\
 &= \sqrt{64 + 9 + \left[48 \left(-\frac{1}{2} \right) \right]} = \sqrt{73 - 24} = \sqrt{49} \\
 F_C &= 7 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Kegiatan

Tujuan : Melakukan percobaan Hukum Coulomb.
 Alat dan bahan : Dua buah balon dan dinamometer.

Cara Kerja:



1. Ambillah dua buah balon karet statif untuk menggantungkan balon itu lengkap dengan talinya, dan selembar plastik PVC.
2. Tiup dan gantungkan dua balon pada statif bertali. Jarak antara kedua balon itu pendek.
3. Setelah balon setimbang diam, lihatlah kedudukan tali lurus atau tidak.
4. Gosoklah plastik ditempelkan pada kedua balon.
5. Lepaskan plastik PVC itu, dan lihatlah kedudukan kedua balon itu.
6. Apa yang menyebabkan kedudukan balon itu renggang?
7. Berdasarkan persamaan bahwa berat balon $= m \cdot g$, carilah gaya yang menyebabkan kedua balon renggang!
8. Setelah balon kembali ke kondisi normal, ambillah sebuah dinamometer. Dengan kekuatan kecil, tariklah sebuah balon itu mendatar sampai sejauh seperti kedudukan ketika terjadi gaya tolak-menolak ($\frac{1}{2}R$), apa yang dapat dinyatakan dengan gaya ini?

9. Masukkan data-data yang didapat ke dalam tabel berikut ini.

m	mg	R	F_g	$F_{\text{dinamometer}}$

Diskusi:

1. Apa yang dapat disimpulkan dari percobaan ini?
2. Bilamana besar kedua muatan balon tersebut adalah sama Q , carilah besarnya!

Uji Kemampuan 4.1

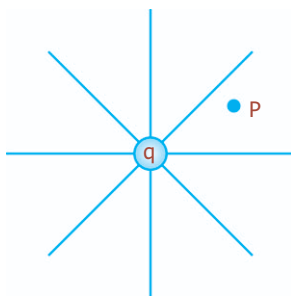
Dua muatan titik masing-masing sebesar $0,06 \mu\text{C}$ dipisahkan pada jarak 8 cm.

Tentukan:

- a. besarnya gaya yang dilakukan oleh satu muatan pada muatan lainnya,
- b. jumlah satuan muatan dasar pada masing-masing muatan!



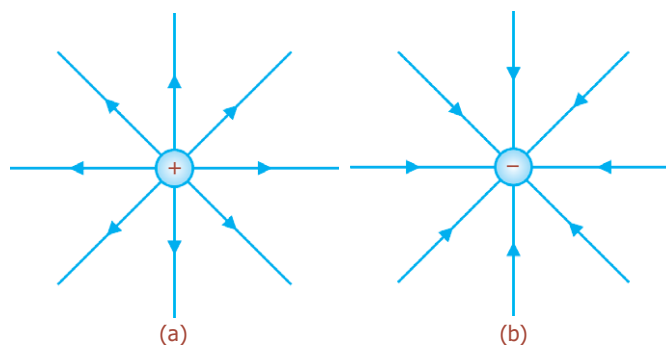
C. Medan Listrik



Gambar 4.5 Medan listrik mengelilingi setiap muatan, P adalah titik sembarang.

Benda yang bermuatan listrik dikelilingi sebuah daerah yang disebut medan listrik. Dalam medan ini, muatan listrik dapat dideteksi. Menurut Faraday (1791-1867), suatu medan listrik keluar dari setiap muatan dan menyebar ke seluruh ruangan, seperti pada Gambar 4.5.

Untuk memvisualisasikan medan listrik, dilakukan dengan menggambarkan serangkaian garis untuk menunjukkan arah medan listrik pada berbagai titik di ruang, yang disebut garis-garis gaya listrik, dan ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Garis-garis medan listrik (a) untuk satu muatan positif, (b) untuk satu muatan negatif.

Gambar 4.7 menunjukkan garis-garis medan listrik antara dua muatan. Dari gambar terlihat bahwa arah garis medan listrik adalah dari muatan positif ke muatan negatif, dan arah medan pada titik manapun mengarah secara tangensial sebagaimana ditunjukkan oleh anak panah pada titik P.

Ukuran kekuatan dari medan listrik pada suatu titik, didefinisikan sebagai gaya per satuan muatan pada muatan listrik yang ditempatkan pada titik tersebut, yang disebut **kuat medan listrik** (E). Jika gaya listrik F dan muatan adalah q , maka secara matematis kuat medan listrik dirumuskan:

$$E = \frac{F}{q} \dots\dots\dots (4.4)$$

Satuan E adalah newton per coulomb (N/C).

Persamaan (4.4) untuk mengukur medan listrik di semua titik pada ruang, sedangkan medan listrik pada jarak r dari satu muatan titik Q adalah:

$$E = \frac{k \cdot q \cdot Q / r^2}{q}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2} \dots\dots\dots (4.5)$$

atau

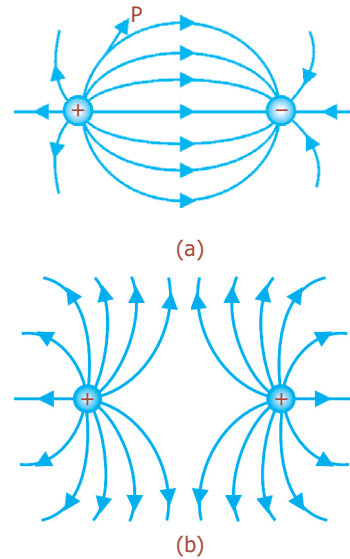
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \dots\dots\dots (4.6)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa E hanya bergantung pada muatan Q yang menghasilkan medan tersebut.

Hukum Gauss

Hukum mengenai gaya elektrostatis dikemukakan oleh Charles Augustin de Coulomb dalam Hukum Coulombnya. Kita dapat menyatakan Hukum Coulomb di dalam bentuk lain, yang dinamakan Hukum Gauss, yang dapat digunakan untuk menghitung kuat medan listrik pada kasus-kasus tertentu yang bersifat simetri. **Hukum Gauss** menyatakan bahwa “jumlah aljabar garis-garis gaya magnet (*fluks*) listrik yang menembus permukaan tertutup sebanding dengan jumlah aljabar muatan listrik di dalam permukaan tersebut”. Pernyataan tersebut dapat dirumuskan:

$$N = \sum q \dots\dots\dots (4.7)$$

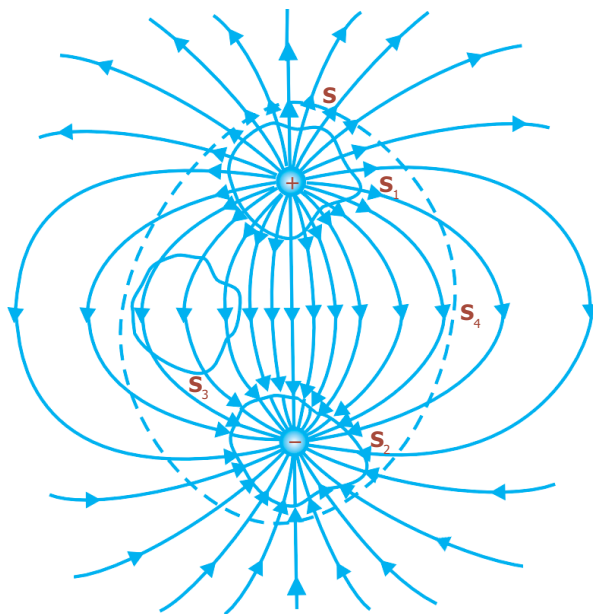


Gambar 4.7 Garis-garis medan listrik antara dua muatan: (a) berlawanan jenis, (b) sejenis.

Komet

Kolom mengingat

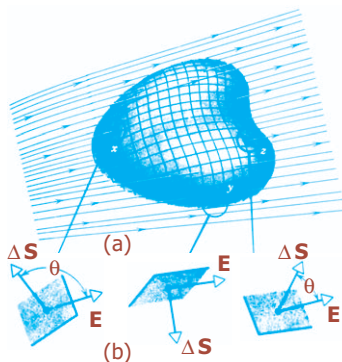
Dalam bidang astronomi, Gauss menemukan cara untuk menentukan lintasan planet.



Gambar 4.8 Dua muatan sama besar dan berlawanan tanda. Garis putus-putus menyatakan perpotongan di antara permukaan tertutup hipotetik dengan bidang gambar.

1. Fluks Medan Listrik

Fluks medan listrik yang disimbolkan Φ_E , dapat dinyatakan oleh jumlah garis yang melalui suatu penampang tegak lurus. Kerapatan fluks listrik pada titik tersebut adalah jumlah per satuan luas pada titik itu. Untuk permukaan tertutup di dalam sebuah medan listrik maka kita akan melihat bahwa Φ_E adalah positif jika garis-garis gaya mengarah ke luar, dan adalah negatif jika garis-garis gaya menuju ke dalam, seperti yang diperlihatkan Gambar 4.8. Sehingga, Φ_E adalah positif untuk permukaan S_1 dan negatif untuk S_2 . Φ_E untuk permukaan S_3 adalah nol.



Gambar 4.9 (a) Sebuah permukaan tertutup dicelupkan di dalam medan listrik tak uniform. (b) Tiga elemen luas permukaan tertutup.

Pada Gambar 4.9(a) menunjukkan sebuah permukaan tertutup yang dicelupkan di dalam medan listrik tak uniform. Misalnya, permukaan tersebut dibagi menjadi segiempat-segiempat kuadratis ΔS yang cukup kecil, sehingga dianggap sebagai bidang datar. Elemen luas seperti itu dinyatakan sebagai sebuah vektor ΔS , yang besarnya menyatakan luas ΔS . Arah ΔS sebagai normal pada permukaan yang digambarkan ke arah luar. Sebuah vektor medan listrik E digambarkan oleh tiap segiempat kuadratis. Vektor-vektor E dan ΔS membentuk sudut θ terhadap satu sama lain. Perbesaran segiempat kuadratis dari Gambar 4.9(b) ditandai dengan x , y , dan z , di mana pada x , $\theta > 90^\circ$ (E menuju ke dalam); pada y , $\theta = 90^\circ$ (E sejajar pada permukaan); dan pada z , $\theta < 90^\circ$ (E menuju ke luar). Sehingga, definisi mengenai fluks adalah:

$$\Phi_E \equiv \sum E \cdot \Delta S \dots \dots \dots (4.8)$$

Jika E di mana-mana menuju ke luar, $\theta < 90^\circ$, maka $E \cdot \Delta S$ positif (Gambar 4.8, permukaan S_1). Jika E menuju ke dalam $\theta > 90^\circ$, $E \cdot \Delta S$ akan menjadi negatif, dan Φ_E permukaan akan negatif (Gambar 4.8, permukaan S_2). Dengan menggantikan penjumlahan terhadap permukaan (persamaan (4.8)) dengan sebuah integral terhadap permukaan akan diperoleh:

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \dots\dots\dots (4.9)$$

Dari persamaan (4.8), kita dapat menentukan bahwa satuan SI yang sesuai untuk fluks listrik (Φ_E) adalah newton.meter²/coulomb (Nm²/C).

Hubungan antara Φ_E untuk permukaan dan muatan netto q , berdasarkan Hukum Gauss adalah:

$$\epsilon_0 \Phi_E = q \dots\dots\dots (4.10)$$

dengan menggunakan persamaan (4.9) diperoleh:

$$\epsilon_0 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = q \dots\dots\dots (4.11)$$

Pada persamaan (4.10), jika sebuah permukaan mencakup muatan-muatan yang sama dan berlawanan tandanya, maka fluks Φ_E adalah nol. Hukum Gauss dapat digunakan untuk menghitung E jika distribusi muatan adalah sedemikian simetris sehingga kita dapat dengan mudah menghitung integral di dalam persamaan (4.11).

2. Medan Listrik di Dekat Muatan Titik

Sebuah muatan titik q terlihat pada Gambar 4.10. Medan listrik yang terjadi pada permukaan bola yang jari-jarinya r dan berpusat pada muatan tersebut, dapat ditentukan dengan menggunakan Hukum Gauss. Pada gambar tersebut, \mathbf{E} dan $d\mathbf{S}$ pada setiap titik pada permukaan Gauss diarahkan ke luar di dalam arah radial. Sudut di antara \mathbf{E} dan $d\mathbf{S}$ adalah nol dan kuantitas \mathbf{E} dan $d\mathbf{S}$ akan menjadi $E \cdot dS$ saja. Dengan demikian, Hukum Gauss dari persamaan (4.11) akan menjadi:

$$\epsilon_0 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \epsilon_0 \oint E \cdot dS = q$$

karena E adalah konstan untuk semua titik pada bola, maka E dapat dikeluarkan dari integral, yang akan menghasilkan:

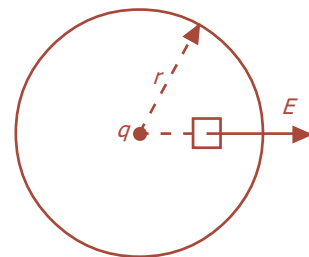
$$\epsilon_0 \cdot E \oint dS = q$$

dengan integral tersebut menyatakan luas bola, sehingga:

$$\epsilon_0 E (4\pi r^2) = q \text{ atau } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \dots\dots\dots (4.12)$$

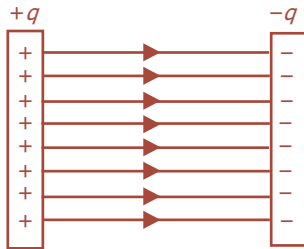
dengan $k = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0}$. Sehingga besarnya medan listrik E pada setiap titik yang jaraknya r dari sebuah muatan titik q adalah:

$$E = k \frac{q}{r^2} \dots\dots\dots (4.13)$$



Gambar 4.10 Sebuah permukaan Gauss berbentuk bola.

3. Medan Listrik di antara Dua Keping Sejajar



Gambar 4.11 Medan listrik antara dua keping sejajar.

Pada dua keping sejajar yang mempunyai muatan listrik sama, tetapi berlawanan jenisnya, antara kedua keping tersebut terdapat medan listrik homogen. Di luar kedua keping juga terdapat medan listrik yang sangat kecil jika dibandingkan dengan medan listrik di antara kedua keping, sehingga dapat diabaikan, seperti pada Gambar 4.11.

Jika luas keping A , masing-masing keping bermuatan $+q$ dan $-q$, medan listrik dinyatakan oleh banyaknya garis-garis gaya, sedangkan garis-garis gaya dinyatakan sebagai jumlah muatan yang menimbulkan garis gaya tersebut (Hukum Gauss). Muatan listrik tiap satu satuan luas keping penghantar didefinisikan sebagai **rapat muatan permukaan** diberi lambang σ (sigma), yang diukur dalam C/m^2 .

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

$$\text{karena, } N = \epsilon_0 \cdot E \cdot A$$

$$\text{maka: } \sigma = \frac{\epsilon_0 \cdot E \cdot A}{A}$$

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot E$$

Sehingga, kuat medan listrik antara kedua keping sejajar adalah:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (4.14)$$

dengan:

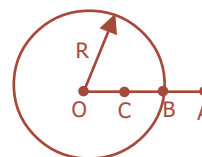
E = kuat medan listrik (N/C)

σ = rapat muatan keping (C/m^2)

ϵ_0 = permitivitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12} \text{ C/Nm}^2$

Contoh Soal

1. Bola konduktor dengan jari-jari 10 cm bermuatan listrik 500 μC . Titik A, B, dan C terletak segaris terhadap pusat bola dengan jarak masing-masing 12 cm, 10 cm, dan 8 cm terhadap pusat bola. Hitunglah kuat medan listrik di titik A, B, dan C!



Penyelesaian:

Diketahui: $R = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$ $r_B = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$
 $q = 500 \text{ } \mu\text{C} = 5 \times 10^{-4} \text{ C}$ $r_C = 8 \text{ cm} = 8 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $r_A = 12 \text{ cm} = 12 \times 10^{-2} \text{ m}$

Ditanya: a. $E_A = \dots ?$
b. $E_B = \dots ?$
c. $E_C = \dots ?$

Jawab:

a. Kuat medan listrik di titik A

$$E_A = k \frac{q}{r_A^2} = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-4}}{(12 \times 10^{-2})^2} = \frac{45 \times 10^5}{144 \times 10^{-4}} = 3,1 \times 10^8 \text{ N/C}$$

b. Kuat medan listrik di titik B

$$E_B = k \frac{q}{r_B^2} = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-4}}{(10^{-1})^2} = \frac{45 \times 10^5}{10^{-2}} = 4,5 \times 10^8 \text{ N/C}$$

c. Kuat medan listrik di titik C

$E_C = 0$, karena berada di dalam bola, sehingga tidak dipengaruhi muatan listrik.

2. Sebuah bola kecil bermuatan listrik $10 \text{ } \mu\text{C}$ berada di antara keping sejajar P dan Q dengan muatan yang berbeda jenis dengan rapat muatan $1,77 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan permitivitas udara adalah $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, hitung massa bola tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $q = 10 \text{ } \mu\text{C} = 10^{-5} \text{ C}$
 $\sigma = 1,77 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$
 $g = 10 \text{ m/s}^2$
 $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

Ditanya: $m = \dots ?$

Jawab:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{1,77 \times 10^{-8}}{8,85 \times 10^{-12}} = 2.000 \text{ N/C}$$

Dari gambar di atas, syarat bola dalam keadaan setimbang adalah jika:

$$F = w$$

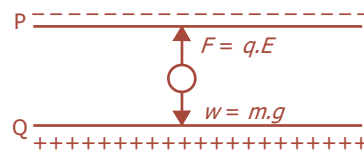
$$q \cdot E = m \cdot g$$

$$m = \frac{q \cdot E}{g} = \frac{(10^{-5})(2.000)}{10}$$

$$= \frac{2 \times 10^{-2}}{10}$$

$$m = 2 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$m = 2 \text{ gram}$$

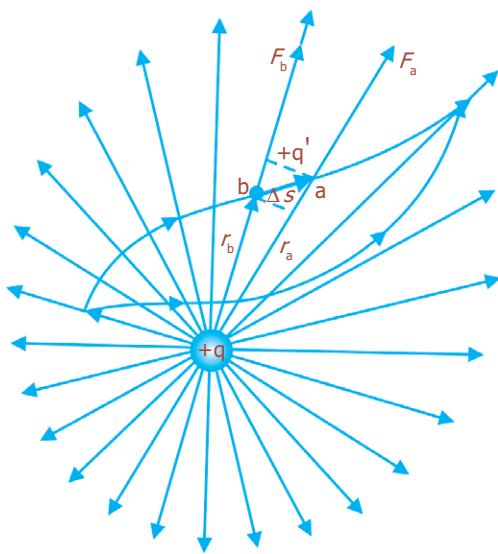


Uji Kemampuan 4.2

Jika suatu muatan uji dari 4 nC diletakkan pada suatu titik, muatan tersebut mengalami gaya sebesar 5×10^{-4} N. Berapakah besar medan listrik E pada titik tersebut?



D. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik



Gambar 4.12 Muatan q' dipindahkan di dalam medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan q .

1. Energi Potensial Listrik

Pada Gambar 4.12 memperlihatkan sebuah muatan listrik $+q'$ di dalam medan listrik homogen yang ditimbulkan oleh muatan listrik $+q$, dipindahkan dari titik a ke b dengan lintasan Δs . Untuk memindahkan muatan dari titik a ke b diperlukan usaha (W). Usaha yang diperlukan oleh muatan untuk berpindah sepanjang Δs adalah ΔW . Apabila posisi a adalah r_a dan posisi b adalah r_b , besar usaha yang dilakukan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_a = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r_a^2} \text{ (gaya elektrostatik pada titik a)}$$

$$F_b = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r_b^2} \text{ (gaya elektrostatik pada titik b)}$$

Untuk Δs yang kecil (Δs mendekati nol) lintasan perpindahan muatan $+q'$ dapat dianggap lurus, dan gaya elektrostatik rata-rata selama muatan $+q'$ dipindahkan dapat dinyatakan:

$$F_c = \sqrt{F_a \cdot F_b}$$

$$F_c = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r_a r_b}$$

Untuk memindahkan muatan q' dari a ke b tanpa kecepatan, diperlukan gaya F yang besarnya sama dengan F_c , tetapi arahnya berlawanan.

Jadi,

$$F = -F_c = -\frac{k \cdot q \cdot q'}{r_a r_b} F_c$$

Apabila arah gaya F terhadap arah perpindahan muatan $+q'$ bersudut α , maka usaha perpindahan muatan $+q'$ dari a ke b adalah:

$$\begin{aligned}\Delta W &= F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha \\ \Delta W &= -F_c \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots (4.15)\end{aligned}$$

Usaha pemindahan muatan $+q'$ dari a ke b sama dengan beda energi potensial listrik di titik a dan b .

$$\begin{aligned}\Delta Ep &= \Delta W \\ \Delta Ep &= -F_c \cos \alpha \dots\dots\dots (4.16)\end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan di atas, besar usaha untuk memindahkan suatu muatan dari titik a ke titik b dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$W_{a \rightarrow b} = k \cdot q \cdot q' \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right) \dots\dots\dots (4.17)$$

Berdasarkan persamaan (4.17) diketahui bahwa usaha tidak bergantung pada panjang lintasan yang ditempuh, tetapi hanya bergantung pada kedudukan awal dan akhir saja. Medan gaya yang demikian dinamakan medan gaya konservatif.

Jika muatan $+q'$ semula pada jarak tak terhingga (∞), besar energi potensialnya adalah nol. Dengan demikian, apabila muatan $+q'$ dipindahkan dari tempat yang jauh tak terhingga ke suatu titik b , besar usahanya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}Ep_a &= 0, \text{ karena } \frac{1}{r_a} = 0 \\ W &= Ep_b - 0 = \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{\infty} \right) \\ W &= Ep_b = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r} \dots\dots\dots (4.18)\end{aligned}$$

Jadi, untuk sembarang titik, besar energi potensialnya dirumuskan:

$$Ep = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r} \dots\dots\dots (4.19)$$

dengan:

- Ep = energi potensial listrik (J)
- r = jarak antara $+q$ dan $-q$ (m)
- q, q' = muatan listrik (C)
- k = konstanta pembanding ($9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$)

Contoh Soal

1. Sebuah muatan listrik dipindahkan dalam medan listrik homogen dengan gaya sebesar $2\sqrt{3}$ N sejauh 20 cm. Jika arah gaya bersudut 30° terhadap perpindahan muatan listrik, berapa beda potensial listrik tempat kedudukan awal dan akhir muatan listrik tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui: $F = 2\sqrt{3}$ N

$\Delta s = 20 \text{ cm} = 2 \times 10^{-1} \text{ m}$

$\alpha = 30^\circ$

Ditanya: $\Delta E_p = \dots ?$

Jawab:

$$\Delta E_p = F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha = (-2\sqrt{3})(2 \times 10^{-1}) \cos 30^\circ$$

$$\Delta E_p = (-2\sqrt{3})(2 \times 10^{-1}) \frac{1}{2} \sqrt{3} = -6 \times 10^{-1} \text{ joule} = -0,6 \text{ J}$$

2. Titik P, Q, dan R terletak pada satu garis dengan PQ = 2 m dan QR = 3 m. Pada masing-masing titik terdapat muatan $2 \mu\text{C}$, $3 \mu\text{C}$, dan $-5 \mu\text{C}$. Tentukan besarnya energi potensial muatan di Q!

Penyelesaian:

Diketahui: PQ = 2 m

QR = 3 m

$q_P = 2 \mu\text{C} = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$

$q_Q = 3 \mu\text{C} = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$

$q_R = -5 \mu\text{C} = -5 \times 10^{-6} \text{ C}$

Ditanya: $E_{p_Q} = \dots ?$

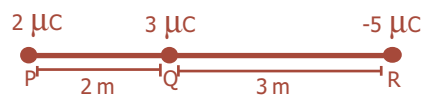
Jawab:

$$\text{Energi potensial P - Q} = E_{p_1} = \frac{k \cdot q_P \cdot q_Q}{r_{PQ}} = \frac{(9 \times 10^9)(2 \times 10^{-6})(3 \times 10^{-6})}{2} = 27 \times 10^{-3} \text{ J}$$

$$\text{Energi potensial Q - R} = E_{p_2} = \frac{k \cdot q_Q \cdot q_R}{r_{QR}} = \frac{(9 \times 10^9)(3 \times 10^{-6})(-5 \times 10^{-6})}{3} = 45 \times 10^{-3} \text{ J}$$

$E_p \text{ di Q} = E_{p_1} + E_{p_2}$ (karena besaran skalar)

$$E_{p_Q} = (27 \times 10^{-3}) + (45 \times 10^{-3}) = 72 \times 10^{-3} \text{ J} = 7,2 \times 10^{-2} \text{ J}$$



Uji Kemampuan 4.3

Jika jarak rata-rata proton dan elektron dalam atom hidrogen adalah $0,53 \text{ \AA}$, berapakah potensial listrik pada jarak tersebut? Dan, berapakah energi potensial elektron dan proton pada proses pemisahannya?

2. Potensial Listrik

Potensial listrik yaitu energi potensial tiap satu satuan muatan positif. Potensial listrik termasuk besaran skalar, dan secara matematis dapat dirumuskan:

$$V = \frac{E_p}{q} \dots\dots\dots (4.20)$$

Beda potensial (tegangan) antara dua titik yang berada di dalam medan listrik homogen, yaitu:

$$\Delta V = \frac{E_p}{q} = \frac{-F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha}{q}$$

karena $\frac{F}{q} = E$, maka: $\Delta V = -E \Delta s \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots (4.21)$

Beda potensial kadang-kadang ditulis dengan persamaan $\Delta V = V_1 - V_2$, untuk selanjutnya hanya ditulis V saja. Sesuai dengan batasan di atas, potensial listrik suatu titik sejauh r dari muatan q besarnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V = \frac{E_p}{q'} \text{ atau } E_p = q' \cdot V$$

$$V = \frac{k \cdot q \cdot q'}{r \cdot q'}$$

$$V = \frac{k \cdot q}{r} \dots\dots\dots (4.22)$$

dengan:

- V = potensial listrik (volt)
- q = muatan listrik (coulomb)
- r = jarak (meter)

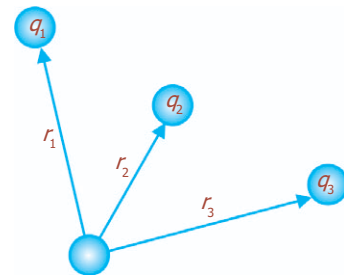
Jika terdiri atas beberapa muatan sumber, besarnya potensial listrik adalah jumlah aljabar biasa dari masing-masing potensial. Misalnya, kumpulan muatan sumber adalah q_1 , q_2 , dan q_3 , maka potensial listrik pada titik P adalah:

$$V_p = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V = \frac{k \cdot q_1}{r_1} + \frac{k \cdot q_2}{r_2} + \frac{k \cdot q_3}{r_3}$$

$$V = k \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} \right) \text{ atau } V = k \sum \frac{q}{r} \dots\dots\dots (4.23)$$

dengan r_1 adalah jarak antara q_1 ke P, r_2 adalah jarak q_2 ke P, dan r_3 adalah jarak q_3 ke P. Potensial listrik merupakan besaran skalar, sehingga dalam memasukkan tanda positif atau negatif pada muatan harus dengan benar.



Gambar 4.13 Potensial listrik bergantung pada muatan q_1 , q_2 , dan q_3 .

Contoh Soal

Bola kecil bermuatan $+2 \mu\text{C}$, $-2 \mu\text{C}$, $3 \mu\text{C}$, dan $-6 \mu\text{C}$ diletakkan di titik-titik sudut sebuah persegi yang mempunyai panjang diagonal $0,2 \text{ m}$. Hitung potensial listrik di titik pusat persegi!

Penyelesaian:

Diketahui:

$$q_1 = +2 \mu\text{C} = 2 \times 10^{-6} \text{ C} \quad q_3 = 3 \mu\text{C} = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$q_2 = -2 \mu\text{C} = -2 \times 10^{-6} \text{ C} \quad q_4 = -6 \mu\text{C} = -6 \times 10^{-6} \text{ C}$$

Panjang diagonal $= 2 \times 10^{-1} \text{ m}$, sehingga jarak tiap-tiap muatan dari titik pusat

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = \frac{1}{2}(2 \times 10^{-1})$$

$$r = 10^{-1} \text{ m}$$

Ditanya: $V_p = \dots ?$

Jawab:

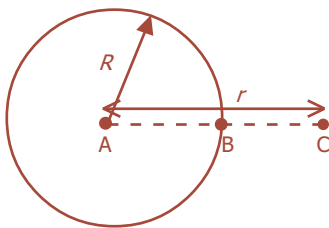
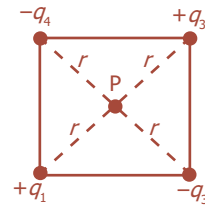
$$V_p = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$V_p = k \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \frac{q_4}{r_4} \right) = k \left(\frac{q_1}{r} + \frac{q_2}{r} + \frac{q_3}{r} + \frac{q_4}{r} \right) = \frac{k}{r} (q_1 + q_2 + q_3 + q_4)$$

$$= \frac{9 \times 10^9}{10^{-1}} (2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6} + 3 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}) = \frac{9 \times 10^9}{10^{-1}} (-3 \times 10^{-6})$$

$$= (9 \times 10^{10}) (-3 \times 10^{-6})$$

$$V_p = -27 \times 10^4 \text{ volt}$$



Gambar 4.14 Potensial listrik pada bola konduktor bermuatan.

3. Potensial Listrik oleh Bola Konduktor Bermuatan

Potensial listrik di sekitar atau di dalam bola konduktor bermuatan dapat ditentukan dengan cara menganggap muatan bola berada di pusat bola. Selanjutnya, potensial listrik di titik-titik pada suatu bola bermuatan, seperti diperlihatkan pada gambar di samping dapat ditentukan melalui persamaan (4.22), yaitu:

$$V_A = \frac{k \cdot q}{R}; \quad V_B = \frac{k \cdot q}{R}; \quad V_C = \frac{k \cdot q}{r}$$

Dari persamaan-persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa potensial listrik di dalam bola sama dengan di permukaan bola, sehingga:

$$V_A = V_B = \frac{k \cdot q}{R} \text{ untuk } r \leq R \dots\dots\dots (4.24)$$

$$V_C = \frac{k \cdot q}{r} \text{ untuk } r > R \dots\dots\dots (4.25)$$

4. Potensial Listrik pada Keping Sejajar

Dua keping sejajar seluas A terpisah dengan jarak d masing-masing diberi muatan $+q$ dan $-q$. Rapat muatan listrik σ didefinisikan sebagai muatan listrik per satuan luas.

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

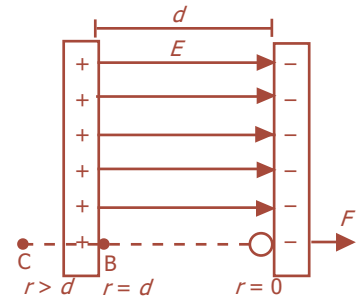
Potensial listrik:

- di antara dua keping

$$V = E \cdot r \quad (4.26)$$

- di luar keping

$$V = E \cdot d \quad (4.27)$$



Gambar 4.15 Potensial listrik pada keping sejajar.



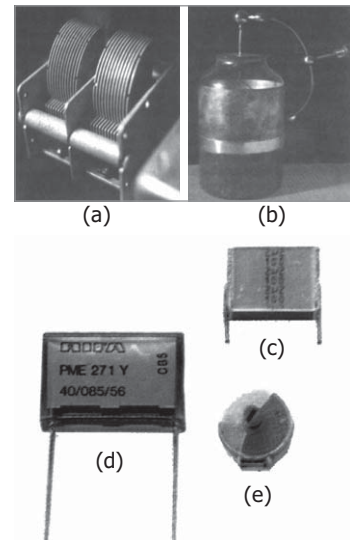
E. Kapasitor

Kapasitor atau kondensator adalah alat (komponen) yang dibuat sedemikian rupa sehingga mampu menyimpan muatan listrik yang besar untuk sementara waktu. Sebuah kapasitor terdiri atas keping-keping logam yang disekat satu sama lain dengan isolator. Isolator penyekat disebut *zat dielektrik*. Simbol yang digunakan untuk menampilkan sebuah kapasitor dalam suatu rangkaian listrik adalah $\text{---}||\text{---}$.

Berdasarkan bahannya, ada beberapa jenis kapasitor, antara lain kapasitor mika, kertas, keramik, plastik, dan elektrolit. Sementara itu, berdasarkan bentuknya dikenal beberapa kapasitor antara lain kapasitor variabel dan kapasitor pipih silinder gulung. Menurut pemasangannya dalam rangkaian listrik, kapasitor dibedakan menjadi **kapasitor berpolar**, yang mempunyai kutub positif dan kutub negatif. Dan juga **kapasitor nonpolar**, yang tidak mempunyai kutub, bila dipasang pada rangkaian arus bolak-balik (AC).

Ada dua cara pemasangan kapasitor, yaitu tanpa memerhatikan kutub-kutubnya (untuk kapasitor nonpolar) dan dengan memerhatikan kutub-kutubnya (untuk kapasitor polar). Beberapa kegunaan kapasitor, antara lain sebagai berikut:

- menyimpan muatan listrik,
- memilih gelombang radio (tuning),
- sebagai perata arus pada rectifier,
- sebagai komponen rangkaian starter kendaraan bermotor,
- memadamkan bunga api pada sistem pengapian mobil,
- sebagai filter dalam catu daya (*power supply*).



Gambar 4.16 Berbagai macam kapasitor antara lain kapasitor: (a) celah-udara, (b) botol leyden, (c) film logam, (d) untuk menekan interferensi (e) variabel mini.

Komet
Kolom mengingat

Fungsi kapasitor:

- untuk menyimpan energi listrik,
- untuk menghindarkan loncatan bunga api listrik pada rangkaian yang menggunakan kumparan misalnya: adaptor, power supply, dan lampu TL,
- untuk memilih gelombang pada pesawat radio penerima (*tuning*).

1. Kapasitas Kapasitor

Kapasitas kapasitor menyatakan kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan listrik. Kapasitas atau kapasitansi (lambang C) didefinisikan sebagai perbandingan antara muatan listrik (q) yang tersimpan dalam kapasitor dan beda potensial (V) antara kedua keping. Secara matematis kapasitas kapasitor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C = \frac{q}{V} \dots\dots\dots (4.28)$$

dengan:

C = kapasitas kapasitor (farad)

q = muatan listrik (coulomb)

V = beda potensial (volt)

Kapasitas 1 F sangat besar, sehingga sering dinyatakan dalam mikrofara (μF) dan pikofara (pF), di mana $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$ dan $1 \text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$.

2. Kapasitas Kapasitor Keping Sejajar

Dua keping (lempeng) sejajar yang diberi muatan listrik berlainan dapat menyimpan muatan listrik. Dengan kata lain, keping sejajar tersebut mempunyai kapasitas. Gambar 4.17 menggambarkan pemindahan muatan listrik $+q$ dari suatu titik ke titik lain, antara kedua bidang kapasitor. Gaya yang dialami setiap titik adalah sama besar. Untuk memindahkan muatan itu tanpa percepatan, diperlukan gaya lain untuk melawan gaya F sebesar $F' = -q.E$. Dengan demikian, besar usahanya adalah:

$$W = F'.d = -q.E.d$$

Mengingat usaha sama dengan perubahan energi potensial listrik, diperoleh persamaan:

$$W = E_p = q(V_2 - V_1)$$

Dengan demikian, beda potensial antara kedua lempeng kapasitor itu adalah:

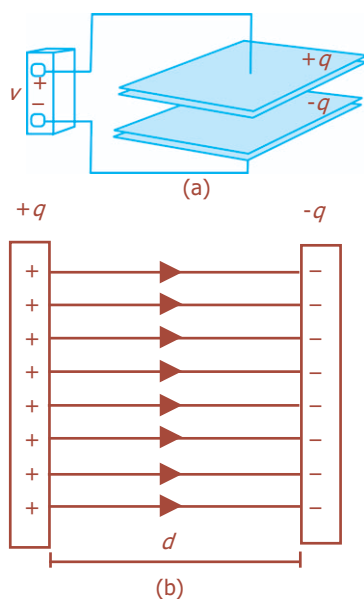
$$V = E.d \dots\dots\dots (4.29)$$

dengan:

V = beda potensial (volt)

E = kuat medan listrik (N/C)

d = jarak kedua keping (m)



Gambar 4.17 (a) Kapasitor keping sejajar; (b) garis-garis medan listrik kapasitor keping sejajar.

Mengingat kuat medan listrik di antara keping sejajar adalah $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{A\epsilon_0}$, maka beda potensial di antara keping sejajar dirumuskan:

$$V = E \cdot d = \frac{q \cdot d}{\epsilon_0 A}, \text{ dimana } q = \frac{V \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$$

Jadi, kapasitas kapasitor keping sejajar adalah:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{V \cdot \epsilon_0 \cdot A}{V \cdot d}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \dots\dots\dots (4.30)$$

dengan:

C = kapasitas kapasitor (F)

ϵ_0 = permitivitas ruang hampa atau udara
($8,85 \times 10^{-12}$ C/Nm²)

d = jarak keping (m)

A = luas penampang keping (m²)

Apabila di antara keping sejajar diberi zat dielektrik, permitivitas ruang hampa atau udara (ϵ_0) diganti dengan permitivitas zat dielektrik.

$$\epsilon = K \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots (4.31)$$

dengan K adalah konstanta dielektrik. Dengan demikian, kapasitas kapasitor keping sejajar yang diberi zat dielektrik dirumuskan:

$$C = \frac{K \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \dots\dots\dots (4.32)$$

3. Kapasitas Bola Konduktor

Pada bola konduktor akan timbul potensial apabila diberi muatan. Berarti, bola konduktor juga mempunyai kapasitas. Dari persamaan $C = \frac{q}{V}$ dan $V = \frac{kq}{r}$, kapasitas bola konduktor dapat dirumuskan:

$$C = \frac{r}{k}$$

$$C = 4\pi\epsilon_0 r \dots\dots\dots (4.33)$$



Dua kapasitor yang disusun secara seri, beda potensial yang lebih besar terdapat pada kapasitor yang kapasitansinya lebih kecil.

Contoh Soal

1. Jika muatan dan kapasitas kapasitor diketahui berturut-turut sebesar 5 μC dan 20 μF , tentukan beda potensial kapasitor tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $q = 5 \mu\text{C} = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$

$C = 20 \mu\text{F} = 2 \times 10^{-5} \text{ F}$

Ditanya: $V \dots ?$

Jawab:

$$C = \frac{q}{V}$$

$$V = \frac{q}{C}$$

$$= \frac{5 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-5}} = \frac{5 \times 10^{-1}}{2} = 0,25 \text{ volt}$$

2. Sebuah kapasitor mempunyai luas bidang 4 cm^2 dan jarak kedua bidang $0,4 \text{ cm}$. Apabila muatan masing-masing bidang $4,425 \text{ } \mu\text{C}$ dan permitivitas listrik udara $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$, tentukan:
- kapasitas kapasitor,
 - kapasitas kapasitor apabila diberi bahan dielektrik dengan konstanta dielektrik 5,
 - beda potensial antara kedua bidang kapasitor!

Penyelesaian:

Diketahui: $A = 4 \text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 $d = 0,4 \text{ cm} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $q = 4,425 \text{ } \mu\text{C} = 4,425 \times 10^{-6} \text{ C}$
 $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$
 $K = 5$

- Ditanya: a. $C = \dots ?$
b. C dengan $K = 5 \dots ?$
c. $V = \dots ?$

Jawab:

a. $C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} = \frac{(8,85 \times 10^{-12})(4 \times 10^{-4})}{4 \times 10^{-3}} = 8,85 \times 10^{-13} \text{ F} = 0,885 \text{ pF}$

- b. C untuk $K = 5$

$$C = \frac{K \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} = 5(0,885) \text{ pF} = 4,425 \text{ pF}$$

c. $C = \frac{q}{V}, V = \frac{q}{C}$

$$V = \frac{4,425 \times 10^{-6}}{4,425 \times 10^{-12}} \\ = 1 \times 10^6 \text{ volt} = 1 \text{ MV}$$

4. Rangkaian Kapasitor

Seperti halnya hambatan listrik, kapasitor juga dapat dirangkai seri, paralel, atau campuran antara seri dan paralel. Untuk rangkaian seri dan paralel pada kapasitor, hasilnya berlainan dengan rangkaian seri dan paralel pada hambatan.

a. Rangkaian Seri Kapasitor

Untuk memperoleh nilai kapasitas kapasitor yang lebih kecil daripada kapasitas semula adalah dengan menyusun beberapa kapasitor secara seri. Apabila rangkaian kapasitor seri diberi beda potensial, pada setiap kapasitor memperoleh jumlah muatan yang sama, meskipun besar kapasitasnya berlainan.

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_{\text{total}} \dots\dots\dots (4.34)$$

Apabila beda potensial kapasitor seri tersebut $V_{AB} = V_s$, berlaku persamaan:

$$V_{AB} = V_s = V_1 + V_2 + V_3 \dots\dots\dots (4.35)$$

Karena $V = \frac{q}{C}$, maka:

$$\frac{q_{\text{total}}}{C_s} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3}$$

Berdasarkan persamaan (4.34), maka:

$$\frac{q}{C_s} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

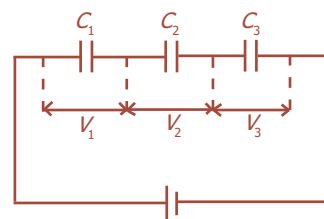
Kedua ruas dibagi q , akan diperoleh:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots\dots\dots (4.36)$$

untuk n kapasitor yang dihubungkan secara seri, persamaan 4.34 menjadi:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \dots\dots\dots (4.37)$$

Bentuk rangkaian kapasitor yang disusun seri ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Rangkaian seri kapasitor.

Contoh Soal

Tiga kapasitor masing-masing berkapasitas $2 \mu\text{F}$, $3 \mu\text{F}$, dan $4 \mu\text{F}$ disusun seri, kemudian diberi sumber listrik 13 volt. Tentukan potensial listrik masing-masing kapasitor!

Penyelesaian:

Diketahui: $C_1 = 2 \mu\text{F}$
 $C_2 = 3 \mu\text{F}$
 $C_3 = 4 \mu\text{F}$
 $V = 13 \text{ volt}$

Ditanya: a. $V_1 = \dots ?$
b. $V_2 = \dots ?$
c. $V_3 = \dots ?$

Jawab:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{6+4+3}{12}$$

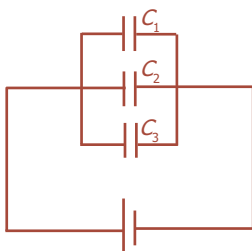
$$C_s = \frac{12}{13} \mu\text{F} = \frac{12}{13} \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$q = C_s \cdot V = \left(\frac{12}{13} \times 10^{-6} \right) \times 13 = 12 \mu\text{C}$$

$$\text{a. } V_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{12 \mu\text{C}}{2 \mu\text{F}} = 6 \text{ volt}$$

$$\text{b. } V_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{12 \mu\text{C}}{3 \mu\text{F}} = 4 \text{ volt}$$

$$\text{c. } V_3 = \frac{q}{C_3} = \frac{12 \mu\text{C}}{4 \mu\text{F}} = 3 \text{ volt}$$



Gambar 4.19 Rangkaian paralel kapasitor.

b. Rangkaian Paralel Kapasitor

Kapasitor yang dirangkai paralel, apabila diberi tegangan V setiap kapasitor akan memperoleh tegangan yang sama, yaitu V , sehingga pada rangkaian kapasitor paralel berlaku:

$$V_{\text{total}} = V_1 = V_2 = V_3 \dots \dots \dots (4.38)$$

dengan menggunakan persamaan (4.28), maka akan diperoleh:

$$q_{\text{total}} = q_1 + q_2 + q_3 \dots \dots \dots (4.39)$$

$$C_{\text{total}} \cdot V_{\text{total}} = C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3$$

Berdasarkan persamaan (4.38), maka diperoleh:

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 \dots \dots \dots (4.40)$$

Apabila terdapat n kapasitor, maka:

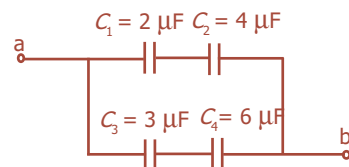
$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \dots \dots \dots (4.41)$$

Gambar 4.19 memperlihatkan bentuk rangkaian pada kapasitor yang disusun paralel.

Contoh Soal

Empat buah kapasitor dirangkai seperti pada gambar. Jika beda potensialnya 12 V, tentukan:

- kapasitas kapasitor penggantinya,
- beda potensial listrik pada masing-masing kapasitor!



Penyelesaian:

Diketahui: $C_1 = 2 \mu\text{F}$
 $C_2 = 4 \mu\text{F}$
 $C_3 = 3 \mu\text{F}$

$C_4 = 6 \mu\text{F}$
 $V_{ab} = 12 \text{ volt}$

Ditanya: a. $C_{\text{pengganti}} = \dots ?$
 b. $V_1, V_2, V_3, V_4 = \dots ?$

Jawab:

a. Kapasitas kapasitor pengganti

C_1 dan C_2 dirangkai seri $\Leftrightarrow C_{s1}$

$$\frac{1}{C_{s1}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

$$C_{s1} = \frac{4}{3} \mu\text{F}$$

C_3 dan C_4 dirangkai seri $\Leftrightarrow C_{s2}$

$$\frac{1}{C_{s2}} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$$

$$C_{s2} = \frac{2}{1} \mu\text{F} = 2 \mu\text{F}$$

C_{s1} dan C_{s2} paralel, sehingga:

$$C_{\text{total}} = C_{s1} + C_{s2} = \frac{4}{3} + 2 = 3\frac{1}{3} \mu\text{F}$$

Jadi, $C_{\text{pengganti}}$ adalah $3\frac{1}{3} \mu\text{F}$.



$$q = C_{\text{total}} \cdot V_{ab}$$

$$= \left(\frac{4}{3}\right) \times 12 = 16 \mu\text{C}$$

$$q_1 = q_2 = q = 16 \mu\text{C}$$

$$V_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{16 \mu\text{C}}{2 \mu\text{F}} = 8 \text{ volt}$$

$$V_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{16 \mu\text{C}}{4 \mu\text{F}} = 4 \text{ volt}$$



$$q = C_{\text{total}} \cdot V_{ab}$$

$$= 2 \mu\text{F} \times 12 \text{ volt}$$

$$q = 24 \mu\text{C}$$

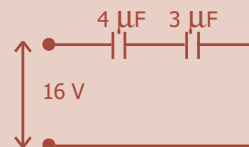
$$q_3 = q_4 = q = 24 \mu\text{C}$$

$$V_3 = \frac{q}{C_3} = \frac{24 \mu\text{C}}{3 \mu\text{F}} = 8 \text{ volt}$$

$$V_4 = \frac{q}{C_4} = \frac{24 \mu\text{C}}{6 \mu\text{F}} = 4 \text{ volt}$$

Uji Kemampuan 4.4

Dua buah kapasitor $4 \mu\text{F}$ dan $3 \mu\text{F}$ terhubung seri di seberang baterai 16 volt, seperti ditunjukkan pada gambar. Tentukan muatan pada kapasitor dan beda potensial pada tiap kapasitor!



5. Energi Kapasitor

Muatan listrik menimbulkan potensial listrik dan untuk memindahkannya diperlukan usaha. Untuk memberi muatan pada suatu kapasitor diperlukan usaha listrik, dan usaha listrik ini disimpan di dalam kapasitor sebagai energi. Pemberian muatan dimulai dari nol sampai dengan q coulomb. Potensial keping kapasitor juga berubah dari nol sampai dengan V secara linier. Maka beda potensial rata-ratanya adalah:

$$V = \frac{V+0}{2} = \frac{\frac{q}{C}+0}{2} = \frac{1}{2} \frac{q}{C}$$

usaha, $W = q \cdot V$

$$W = q \cdot \frac{1}{2} \frac{q}{C}$$

$$W = \frac{q^2}{2C} \dots\dots\dots (4.42)$$

Berdasarkan persamaan (4.28), maka diperoleh:

$$W = \frac{1}{2} \frac{(CV)^2}{C}$$

Jadi, energi yang tersimpan pada kapasitor adalah:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2 \dots\dots\dots (4.43)$$

Contoh Soal

1. Sebuah kapasitor mempunyai kapasitas $4 \mu\text{F}$ diberi beda potensial 25 volt. Berapakah energi yang tersimpan?

Penyelesaian:

Diketahui: $C = 4 \mu\text{F} = 4 \times 10^{-6} \text{ F}$ $V = 25 \text{ volt}$

Ditanya: $W = \dots ?$

Jawab:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2 = \frac{1}{2} (4 \times 10^{-6}) (25)^2 = 1,25 \times 10^{-3} \text{ joule}$$

2. Sebuah kapasitor $1,2 \mu\text{F}$ dihubungkan dengan 3 kV. Hitunglah energi yang tersimpan dalam kapasitor!

Penyelesaian:

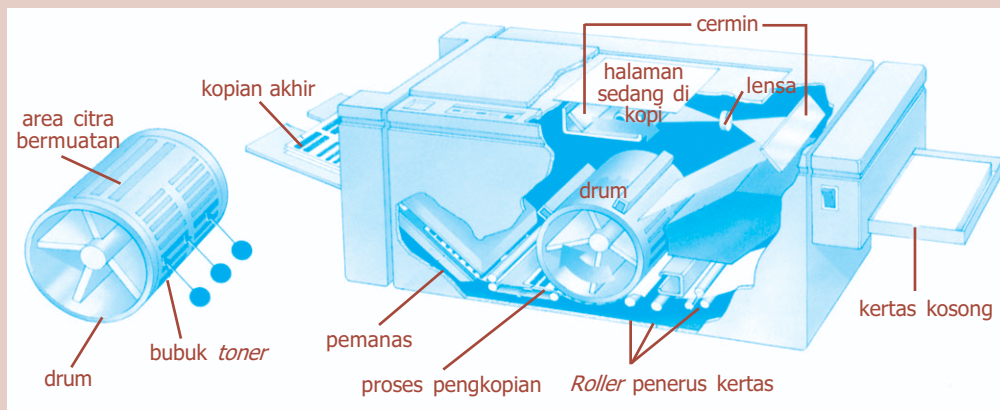
Diketahui: $C = 1,2 \mu\text{F} = 1,2 \times 10^{-6} \text{ F}$ $V = 3 \text{ kV} = 3.000 \text{ V}$

Ditanya: $W = \dots ?$

Jawab:

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} (1,2 \times 10^{-6}) (3.000)^2 = 5,4 \text{ J}$$

Percikan Fisika



Mesin Fotokopi

Mesin fotokopi menghasilkan salinan dokumen secara cepat dan hasilnya jelas. Mesin fotokopi ini dijalankan dengan cara menyorotkan sinar ke dokumen asli. Citra pantulannya difokuskan ke tabung yang dimuati listrik statis. Muatan statis tersebar dan melekat pada tabung dengan menyesuaikan gelap terang pada dokumen asli. Bubuk toner ditarik oleh muatan statis di sekeliling tabung, yang kemudian dipindahkan ke selembur kertas salinan dan dikeringkan melalui pemanasan.

Uji Kemampuan 4.5

1. Pada suatu kapasitor $40 \mu\text{F}$ dimuati hingga 8 volt. Kapasitor dilepaskan dari baterai dan jarak pemisah keping-keping kapasitor dinaikkan dari 2,5 mm sampai 3,0 mm. Tentukan:
 - a. muatan pada kapasitor,
 - b. banyaknya energi yang awalnya tersimpan dalam kapasitor!
2. Hitunglah energi yang tersimpan di dalam sebuah kapasitor 60 pF , jika:
 - a. diisi muatan hingga beda potensial 2 kV, dan
 - b. muatan pada masing-masing pelat adalah 30 nC !
3. Tiga kapasitor masing-masing dengan kapasitansi 120 pF , masing-masing diisi muatan hingga 0,5 kV dan kemudian dihubungkan secara seri. Tentukan:
 - a. beda potensial antara pelat ujung-ujungnya,
 - b. muatan pada masing-masing kapasitor, dan
 - c. energi yang tersimpan di dalam sistem!

Fiesta

Fisikawan Kita



Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806)

Ia ahli fisika bangsa Prancis lahir di Augouleme pada tanggal 14 Juni 1736 dan meninggal di Paris pada tanggal 23 Agustus 1806. Ia dikenal sebagai penemu Hukum Coulomb (1785), neraca puntir (torsi, 1777), insinyur militer, inspektur jenderal pendidikan, dan pengarang.

Coulomb berasal dari keluarga bangsawan. Ia bersekolah di Institut Teknologi Mezieres, sebuah perguruan tinggi teknik pertama di dunia. Setelah meraih gelar insinyur ia masuk Korps insinyur kerajaan.

Tahun 1779 Coulomb menganalisis gesekan pada mesin-mesin berputar yaitu tentang pelumasan. Ia pula yang merintis tentang pembuatan alat yang bekerja di bawah permukaan air laut yaitu, Caisson.

Kilas Balik

- ※ Gaya Coulomb atau gaya elektrostatik dinyatakan:

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \text{ dengan } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2.$$

- ※ Gaya elektrostatik pada muatan-muatan yang segaris.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \dots$$

- ※ Gaya elektrostatik pada muatan-muatan yang tidak segaris.

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2.F_1.F_2.\cos\alpha}$$

- ※ Kuat medan listrik adalah hasil bagi gaya listrik yang bekerja pada suatu muatan uji dengan besar muatan uji tersebut. Besarnya kuat medan listrik dinyatakan:

$$E = \frac{k.Q}{r^2}$$

- ※ Formulasi Hukum Gauss menyatakan bahwa: “jumlah aljabar garis-garis gaya magnet (fluks) listrik yang menembus permukaan tertutup sebanding dengan jumlah aljabar muatan listrik di dalam permukaan tersebut”.

- ※ Kuat medan listrik di antara dua pelat sejajar bermuatan adalah:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

- ※ Usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan dari titik a ke b adalah:

$$W_{ab} = k.q.q' \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right)$$

- ※ Energi potensial listrik dinyatakan:

$$Ep = \frac{k.q.q'}{r}$$

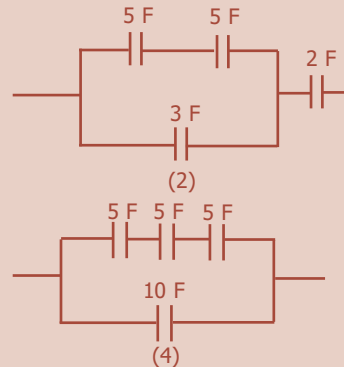
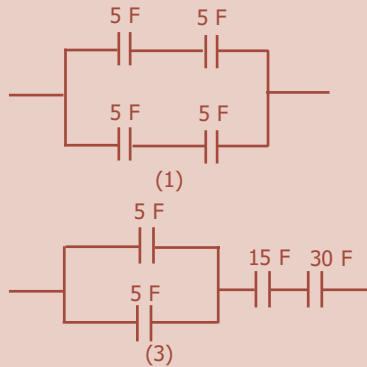
- * Potensial di suatu titik oleh muatan Q adalah: $V = \frac{k \cdot q}{r}$.
- * Hubungan usaha dan beda potensial listrik dirumuskan: $W_{a-b} = q(V_b - V_a)$.
- * Kapasitas kapasitor adalah kemampuan kapasitor menyimpan muatan listrik.
Besarnya dinyatakan oleh: $C = \frac{q}{V}$.
- * Kapasitas kapasitor keping sejajar dinyatakan: $C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$.
 $C = \frac{K \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$, jika keping disisipi bahan dielektrik K , dengan $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$.
- * Kapasitas pada rangkaian kapasitor seri dinyatakan:
$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$
- * Kapasitas pada rangkaian kapasitor paralel dinyatakan:
 $C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$
- * Energi kapasitor dirumuskan:
$$W = \frac{1}{2} Q \cdot V = \frac{1}{2} C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

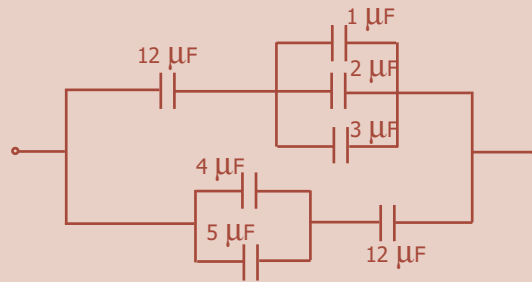
1. Alat untuk mengetahui adanya muatan listrik adalah
 - a. teleskop
 - b. optalmeskop
 - c. elektroskop
 - d. transformator
 - e. stetoskop
2. Dua buah muatan positif terpisah sejauh 50 cm. Jika gaya tolak-menolak kedua muatan 0,9 N dan besar kedua muatan sama, besar muatan tersebut adalah ...
 - a. 12,5 μC
 - b. 10 μC
 - c. 7,5 μC
 - d. 5 μC
 - e. 2,5 μC
3. Empat buah muatan A, B, C, dan D. A dan B tolak-menolak, A dan C tarik-menarik, sedangkan C dan D tolak-menolak. Jika B bermuatan positif, maka ...
 - a. A bermuatan negatif, C positif
 - b. A bermuatan positif, C positif
 - c. D bermuatan negatif, A positif
 - d. D bermuatan negatif, C positif
 - e. C bermuatan negatif, D positif
4. Sebuah benda bermuatan listrik +3 μC . Maka titik x yang kuat medannya $3 \times 10^7 \text{ NC}^{-1}$ berada pada jarak
 - a. 3 cm
 - b. 4 cm
 - c. 5 cm
 - d. 6 cm
 - e. 7 cm

5. Muatan A coulomb saling tarik-menarik dengan muatan B coulomb, yang berjarak d meter satu sama lain. Besarnya energi potensial listrik yang terjadi adalah
- $\frac{A.B}{k.d}$
 - $\frac{A.B.d}{k}$
 - $\frac{A.B}{k^2.d}$
 - $\frac{k.A.B}{d}$
 - $\frac{k.d}{A.B}$
6. Potensial di titik P sejauh r dari muatan q sama dengan V . Potensial di titik Q sejauh R dari muatan $5q$ sama dengan $2V$. Pernyataan yang benar adalah
- $R = 0,1r$
 - $R = r/5$
 - $R = r$
 - $R = 2,5r$
 - $R = 5r$
7. Kapasitas suatu kapasitor keping sejajar menjadi lebih kecil apabila
- luas permukaan kedua keping diperbesar
 - jarak antara kedua kepingnya diperbesar
 - diisi dengan dielektrik yang konstantanya lebih besar
 - beda tegangan kedua kepingnya diperkecil
 - muatan setiap keping dikurangi
8. Empat buah kapasitor dirangkai seperti gambar di bawah ini. Sepasang rangkaian yang mempunyai kapasitas gabungan yang sama adalah



- (1) dan (2)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (3)
 - (3) dan (4)
 - (4) dan (1)
9. Sebuah kapasitor keping sejajar dengan luas keping 50 cm^2 , jarak antara kepingnya $3,54 \text{ mm}$. Jika kapasitor tersebut diberi tegangan 500 V , maka besarnya energi kapasitor tersebut adalah
- $1,6 \times 10^{-6} \text{ J}$
 - $2,5 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - $5,0 \times 10^{-6} \text{ J}$
 - $5,0 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - $5,0 \times 10^{-8} \text{ J}$

10. Besarnya kapasitansi pengganti dari susunan kapasitor yang ditunjukkan pada gambar adalah
- $4 \mu\text{F}$
 - $6 \mu\text{F}$
 - $9 \mu\text{F}$
 - $10 \mu\text{F}$
 - $12 \mu\text{F}$

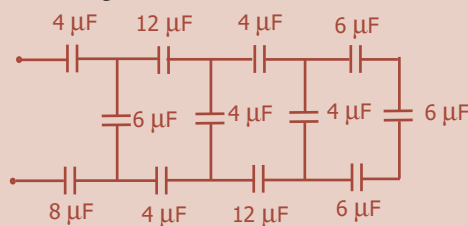


B. Jawablah dengan singkat dan benar!

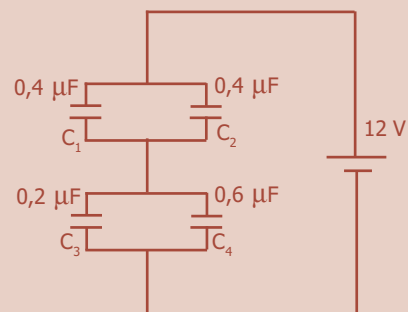
- Dua titik berjarak 4 cm, masing-masing bermuatan 24 coulomb dan -12 coulomb. Tentukan:
 - gaya yang dialami tiap-tiap muatan,
 - resultan gaya yang dialami muatan sebesar 6 coulomb yang ditempatkan di tengah-tengah antara kedua muatan tersebut!
- Dua buah muatan $+32 \mu\text{C}$ dan $-20 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak x (lihat gambar). Sebuah muatan uji disimpan di titik P kemudian dilepaskan, ternyata muatan tersebut tetap diam. Tentukan besarnya x !



- Dua muatan listrik masing-masing $+4,2 \times 10^{-5} \text{ C}$ dan $-6 \times 10^{-5} \text{ C}$ terpisah pada jarak 34 cm. Tentukan:
 - potensial listrik di titik yang terletak pada garis hubung kedua muatan dan berjarak 14 cm dari muatan $-6 \times 10^{-5} \text{ C}$,
 - letak titik pada garis hubung kedua muatan yang memiliki potensial listrik nol!
- Dari rangkaian di bawah ini, tentukan kapasitas kapasitor penggantinya!

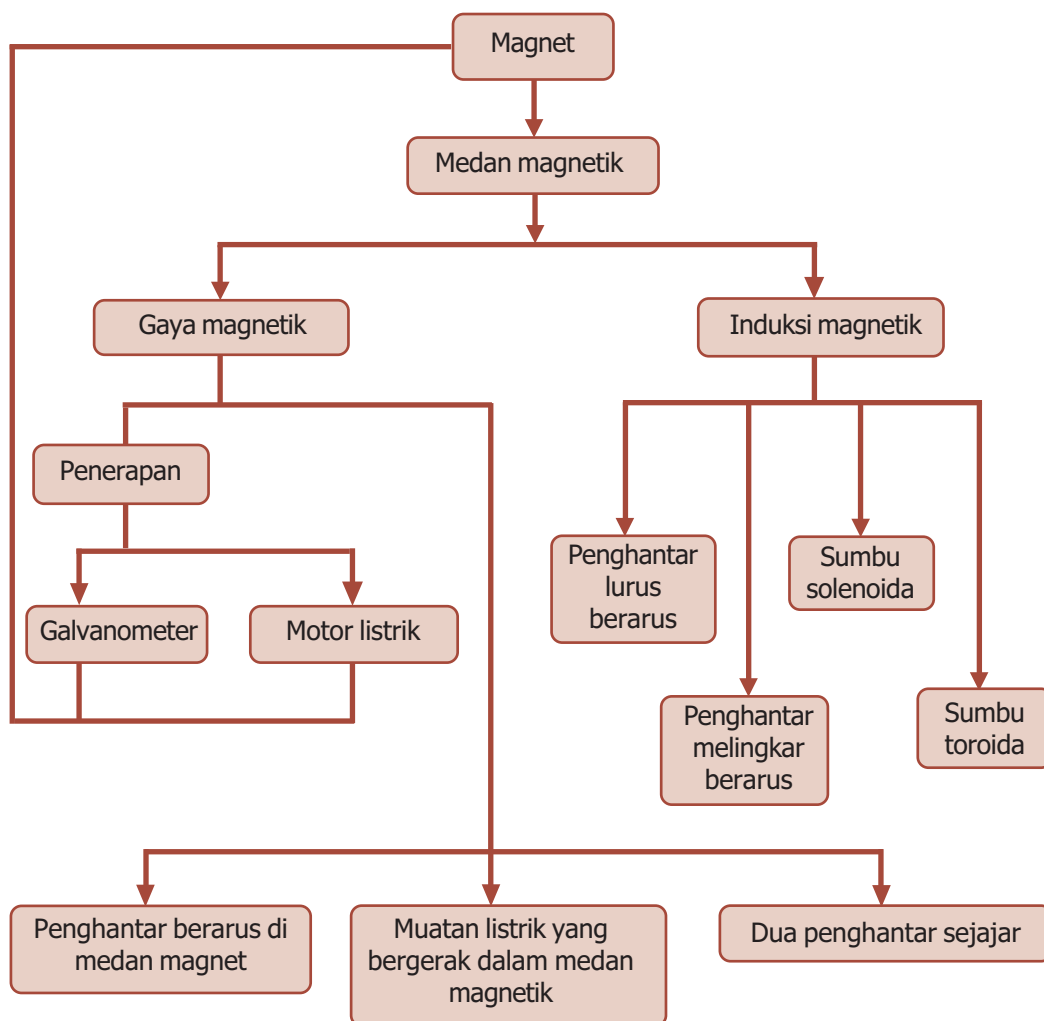


- Empat buah kapasitor dihubungkan seperti pada gambar. Hitunglah muatan dan beda potensial pada masing-masing kapasitor!



PETA KONSEP

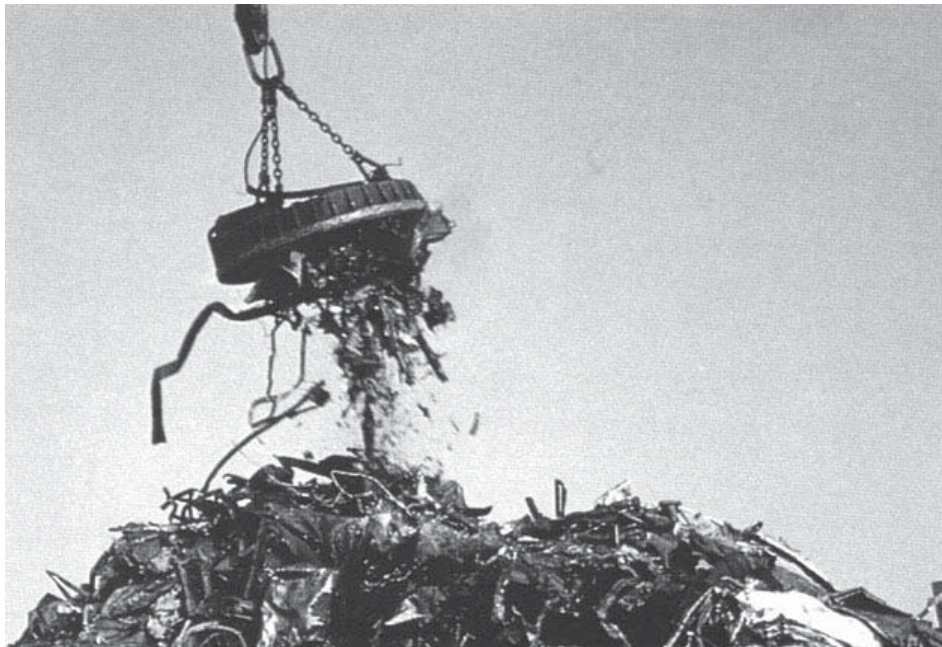
Bab 5 Medan Magnetik



BAB

5

MEDAN MAGNETIK



● Magnet menarik besi.

Sumber: *Jendela Iptek Listrik*,
PT Balai Pustaka, 2000

Pernahkah kalian melihat magnet pengangkat yang digunakan untuk mengangkut rongsokan logam besi dan baja? Coba kalian perhatikan gambar di atas. Magnet listrik yang diaktifkan memiliki kemampuan untuk menarik besi dan baja, serta memungkinkan besi dan baja tersebut dipindahkan ke tempat lain. Bagaimana hal tersebut bisa terjadi? Bagaimana prinsip kerja magnet tersebut? Untuk mengetahui jawabannya, ikutilah uraian pada bab ini.

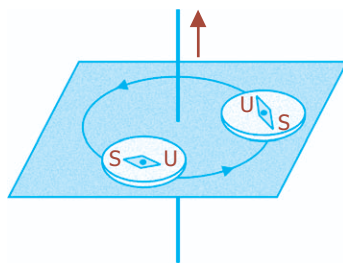
Kata Kunci

arus listrik, gaya magnetik, induksi magnetik, medan magnetik

Medan magnetik didefinisikan sebagai ruangan di sekitar magnet yang masih terpengaruh gaya magnetik. Seperti pada gaya listrik, kita menganggap gaya magnetik tersebut dipindahkan oleh sesuatu, yaitu medan magnetik. Muatan yang bergerak menghasilkan medan magnetik dan medan ini selanjutnya, memberikan suatu gaya pada muatan bergerak lainnya. Karena muatan bergerak menghasilkan arus listrik, interaksi magnetik dapat juga dianggap sebagai interaksi di antara dua arus. Kuat dan arah medan magnetik dapat juga dinyatakan oleh garis gaya magnetik. Jumlah garis gaya per satuan penampang melintang adalah ukuran kuat medan magnetik.



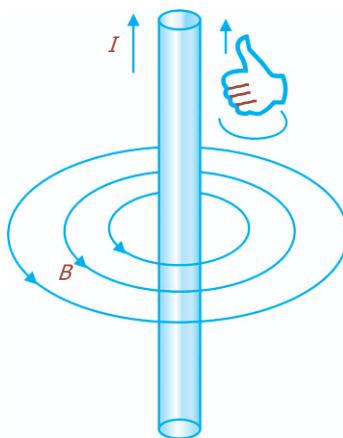
A. Medan Magnetik di Sekitar Arus Listrik



Gambar 5.1 Penyimpangan jarum kompas di dekat kawat berarus listrik.

Pada tahun 1820, seorang ilmuwan berkebangsaan Denmark, Hans Christian Oersted (1777 - 1851) menemukan bahwa terjadi penyimpangan pada jarum kompas ketika didekatkan pada kawat berarus listrik. Hal ini menunjukkan, arus di dalam sebuah kawat dapat menghasilkan efek-efek magnetik. Dapat disimpulkan, bahwa di sekitar arus listrik terdapat medan magnetik.

Garis-garis medan magnetik yang dihasilkan oleh arus pada kawat lurus membentuk lingkaran dengan kawat pada pusatnya. Untuk mengetahui arah garis-garis medan magnetik dapat menggunakan suatu metode yaitu dengan kaidah tangan kanan, seperti yang terlihat pada Gambar 5.2. Ibu jari menunjukkan arah arus konvensional, sedangkan keempat jari lain yang melingkari kawat menunjukkan arah medan magnetik.



Gambar 5.2 Kaidah tangan kanan untuk mengetahui arah medan magnet.

Pemagnetan suatu bahan oleh medan magnet luar disebut induksi. Induksi magnetik sering didefinisikan sebagai timbulnya medan magnetik akibat arus listrik yang mengalir dalam suatu penghantar. Oersted menemukan bahwa arus listrik menghasilkan medan magnetik. Selanjutnya, secara teoritis Laplace (1749 - 1827) menyatakan bahwa kuat medan magnetik atau induksi magnetik di sekitar arus listrik:

- berbanding lurus dengan kuat arus listrik,
- berbanding lurus dengan panjang kawat penghantar,
- berbanding terbalik dengan kuadrat jarak suatu titik dari kawat penghantar tersebut,
- arah induksi magnetik tersebut tegak lurus dengan bidang yang dilalui arus listrik.

Oersted mempublikasikan penemuannya tentang hubungan antara listrik dan magnetisme pada tanggal 21 Juli 1820. Pamflet tersebut berbahasa Latin.

Pada tahun 1820 oleh Biot (1774 - 1862) teori tersebut disempurnakan dengan perhitungan yang didasarkan pada rumus Ampere (1775 - 1836) yang dinyatakan dalam persamaan:

$$dB = k \frac{I \cdot dl \sin \theta}{r^2} \dots\dots\dots (5.1)$$

dengan I menyatakan kuat arus listrik yang mengalir dalam kawat (A), dl menyatakan elemen kawat penghantar, r adalah jarak titik terhadap kawat (m), dB menyatakan kuat medan magnetik (Wb/m^2), dan k adalah suatu konstanta yang memenuhi hubungan:

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi} \dots\dots\dots (5.2)$$

dengan μ_0 menyatakan permeabilitas hampa udara yang besarnya $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$.

1. Induksi Magnetik di Sekitar Penghantar Lurus Berarus

Induksi magnetik yang diakibatkan oleh kawat berarus listrik diperoleh dengan menurunkan persamaan (5.1), yaitu:

$$dB = k \frac{I \cdot dl \sin \theta}{r^2} \dots\dots\dots (5.3)$$

Dengan memasukkan persamaan (5.2) maka akan diperoleh:

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \theta}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (5.4)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2} \dots\dots\dots (5.5)$$

Dalam bentuk vektor, persamaan (5.5) dapat dituliskan menjadi:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} \dots\dots\dots (5.6)$$

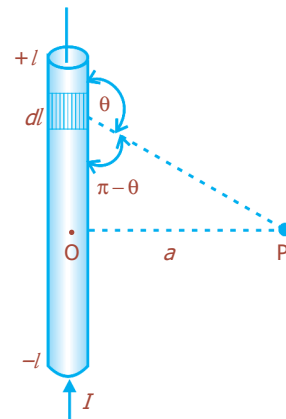
Sehingga, medan magnet total di sembarang titik yang ditimbulkan oleh kawat berarus listrik adalah:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} \dots\dots\dots (5.7)$$

Dari Gambar 5.3 diketahui bahwa:

$$r^2 = a^2 + l^2 \text{ atau } r = \sqrt{a^2 + l^2}$$

$$\sin \theta = \sin (\pi - \theta) = \frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2}}$$



Gambar 5.3 Kuat medan magnetik di titik P.

Kutub magnet bumi berada di 70° U, 100° B & 68° S, 143° T, tetapi selalu berubah secara konstan.

dengan mensubstitusikan dl , r , dan $\sin \theta$ pada persamaan (5.7), maka akan diperoleh:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl(a\sqrt{a^2 + l^2})}{(a^2 + l^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{Idl}{(a^2 + l^2)^{3/2}}$$

Persamaan di atas kemudian diintegrasikan untuk mengetahui induksi magnetik di titik P, sehingga didapatkan:

$$B = \frac{\mu_0 Ia}{4\pi} \int_{-l}^{+l} \frac{dl}{(a^2 + l^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2l}{a\sqrt{a^2 + l^2}} \dots\dots\dots (5.8)$$

Jika panjang kawat $2l \ll a$, kita anggap panjang kawat adalah tak berhingga. Sehingga persamaan (5.8) menjadi:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a}$$

Jadi, besar induksi magnetik di sekitar kawat penghantar lurus berarus yang berjarak a dari kawat berarus listrik I dinyatakan dalam persamaan:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a} \dots\dots\dots (5.9)$$

dengan:

B = kuat medan magnetik (Wb/m² = tesla)

a = jarak titik dari penghantar (m)

I = kuat arus listrik (A)

μ_0 = permeabilitas vakum

Contoh Soal

Tentukan besar induksi magnetik pada jarak 15 cm dari pusat sebuah penghantar lurus yang berarus listrik 45 A!

Penyelesaian:

Diketahui: jarak ke penghantar, $a = 15 \text{ cm} = 15 \times 10^{-2} \text{ m}$

kuat arus listrik, $I = 45 \text{ A}$

permeabilitas vakum, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$

Ditanya: Besar induksi magnetik oleh penghantar lurus (B)... ?

Jawab:

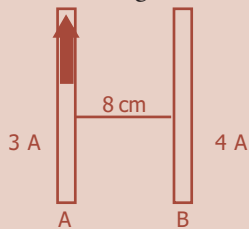
$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a}$$

$$= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(45)}{(2\pi)(15 \times 10^{-2})} = 6 \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$$

$$B = 6 \times 10^{-5} \text{ tesla}$$

Uji Kemampuan 5.1

1. Dua kawat lurus panjang sejajar masing-masing dialiri arus yang sama besar yaitu 18 A. Satu sama lain terpisah pada jarak 6 cm. Tentukan induksi magnetik pada suatu titik di antara kedua kawat yang berjarak 4 cm dari kawat pertama dan 2 cm dari kawat kedua, jika arah arus pada kedua kawat adalah searah!
2. Perhatikan gambar berikut!

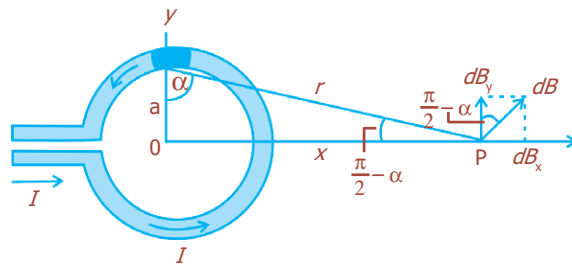


Dua kawat sejajar terpisah 8 cm satu sama lain dan mengalirkan arus sebesar 3 A dan 4 A. Tentukan gaya pada kawat B yang panjangnya 80 cm, jika arus-arus tersebut:

- a. sejajar searah,
- b. sejajar berlawanan arah!

2. Induksi Magnetik yang ditimbulkan Penghantar Melingkar Berarus

Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari a dan dialiri arus listrik I , ditunjukkan pada Gambar 5.4. Untuk menentukan induksi magnetik di titik P yang berjarak x dari pusat lingkaran, dapat dilakukan dengan menggunakan Hukum Biot-Savart. Dari gambar terlihat bahwa r tegak lurus terhadap dl atau $\theta = 90^\circ$, sehingga $\sin \theta = 1$. Dari persamaan Biot-Savart, maka:



Gambar 5.4 Penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari a yang dialiri arus I .

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \dots \dots \dots (5.10)$$

Karena, $a^2 + x^2 = r^2$, maka:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(a^2 + x^2)} \dots \dots \dots (5.11)$$

Dari gambar diketahui bahwa:

$$\sin \alpha = \frac{x}{r} = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$

dan $\cos \alpha = \frac{a}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$. Sehingga komponen vektor dB yang sejajar sumbu x adalah:

Bahan yang paling bersifat magnet adalah neodimium besi barida ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$).

$$dB_x = dB \cdot \cos \alpha = \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \frac{dl}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \frac{dl}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

Sementara itu, vektor $d\mathbf{B}$ yang tegak lurus sumbu x adalah:

$$dB_y = dB \sin \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$

$$= \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \frac{dl}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \dots \dots \dots (5.12)$$

Karena sifat simetri, maka komponen yang tegak lurus sumbu x akan saling meniadakan, sehingga hanya komponen sejajar sumbu x yang ada. Diperoleh:

$$B_x = \int \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \frac{dl}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \dots \dots \dots (5.13)$$

Nilai a , I , dan x adalah suatu tetapan, karena mempunyai nilai yang sama pada tiap elemen arus. Jadi:

$$B_x = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \frac{1}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \int dl$$

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \int dl \dots \dots \dots (5.14)$$

Karena penghantar berupa lingkaran, maka $\int dl$ menyatakan keliling lingkaran, dengan jari-jarinya adalah a , yang dinyatakan oleh:

$$\int dl = 2\pi a$$

Dengan mensubstitusikan persamaan di atas pada persamaan (5.14) akan diperoleh:

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}} \dots \dots \dots (5.15)$$

Induksi magnetik akan bernilai maksimum ketika $x = 0$ atau titik terletak di pusat lingkaran, maka akan berlaku:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I}{2a} \dots \dots \dots (5.16)$$

Untuk penghantar melingkar yang terdiri atas N lilitan, maka induksi magnetik yang terjadi di pusat lingkaran adalah:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2a} \dots \dots \dots (5.17)$$

dengan:

B_x = induksi magnetik (Wb/m^2)

I = kuat arus listrik (A)

a = jari-jari lingkaran (m)

N = jumlah lilitan

Contoh Soal

Sebuah kumparan kawat melingkar berjari-jari 10 cm memiliki 40 lilitan. Jika arus listrik yang mengalir dalam kumparan tersebut 8 ampere, berapakah induksi magnetik yang terjadi di pusat kumparan?

Penyelesaian:

Diketahui: kuat arus, $I = 8 \text{ A}$
jari-jari, $r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$
jumlah lilitan, $N = 40$

Ditanya: Induksi magnetik, $B \dots ?$

Jawab:

Induksi magnetik di pusat kumparan kawat melingkar berarus ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2a} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(40)(8)}{2(0,1)} = 6,4\pi \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 5.2

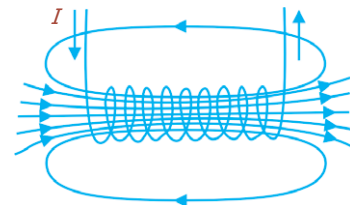
Sebuah kumparan melingkar datar memiliki 18 lilitan dan jari-jari 6,0 cm. Berapakah arus listrik yang harus dialirkan melalui kumparan tersebut untuk menghasilkan induksi magnetik sebesar $4 \times 10^{-4} \text{ T}$ di pusatnya?

3. Induksi Magnetik pada Sumbu Solenoida

Solenoida didefinisikan sebagai sebuah kumparan dari kawat yang diameternya sangat kecil dibanding panjangnya. Apabila dialiri arus listrik, kumparan ini akan menjadi magnet listrik. Medan solenoida tersebut merupakan jumlah vektor dari medan-medan yang ditimbulkan oleh semua lilitan yang membentuk solenoida tersebut. Pada Gambar 5.5 memperlihatkan medan magnetik yang terbentuk pada solenoida. Kedua ujung pada solenoida dapat dianggap sebagai kutub utara dan kutub selatan magnet, tergantung arah arusnya. Kita dapat menentukan kutub utara pada gambar tersebut adalah di ujung kanan, karena garis-garis medan magnet meninggalkan kutub utara magnet.

Jika arus I mengalir pada kawat solenoida, maka induksi magnetik dalam solenoida (kumparan panjang) berlaku:

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot n \dots \dots \dots (5.18)$$



Gambar 5.5 Medan magnet pada solenoida.

Kumparan merupakan sejumlah gulungan kawat berarus, yang dibuat dengan melilitkan kawat tersebut pada sepotong bahan yang terbentuk (former). Contohnya adalah kumparan datar dan solenoida.

Persamaan (5.18) digunakan untuk menentukan induksi magnet di tengah solenoida. Sementara itu, untuk mengetahui induksi magnetik di ujung solenoida dengan persamaan:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \dots\dots\dots (5.19)$$

Induksi magnetik (B) hanya bergantung pada jumlah lilitan per satuan panjang (n), dan arus (I). Medan tidak tergantung pada posisi di dalam solenoida, sehingga B seragam. Hal ini hanya berlaku untuk solenoida tak hingga, tetapi merupakan pendekatan yang baik untuk titik-titik yang sebenarnya tidak dekat ke ujung.

Contoh Soal

Suatu solenoida yang panjangnya 2 m memiliki 800 lilitan dan jari-jari 2 cm. Jika solenoida dialiri arus 0,5 A, tentukan induksi magnetik:

- di pusat solenoida,
- di ujung solenoida!

Penyelesaian:

panjang solenoida, $l = 2$ m

banyak lilitan, $n = 800$

arus listrik, $I = 0,5$ A

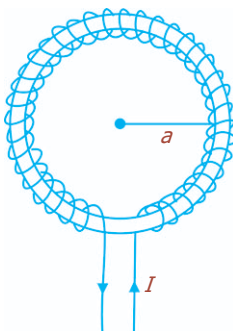
- Induksi magnetik di pusat solenoida

$$B_{\text{pusat}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{l} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(0,5)(800)}{2} = 8\pi \times 10^{-5} \text{ tesla}$$

- Induksi magnetik di ujung solenoida

$$B_{\text{ujung}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2l}$$

$$B_{\text{ujung}} = \frac{1}{2} B_{\text{pusat}} = \frac{1}{2} (8\pi \times 10^{-5}) = 4\pi \times 10^{-5} \text{ T}$$



Gambar 5.6 Toroida

4. Induksi Magnetik pada Sumbu Toroida

Solenoida panjang yang dilengkungkan sehingga berbentuk lingkaran dinamakan *toroida*, seperti yang terlihat pada Gambar 5.6. Induksi magnetik tetap berada di dalam toroida, dan besarnya dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \dots\dots\dots (5.20)$$

Perbandingan antara jumlah lilitan N dan keliling lingkaran $2\pi a$ merupakan jumlah lilitan per satuan panjang n , sehingga diperoleh:

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot n \dots\dots\dots (5.21)$$

Contoh Soal

Sebuah toroida berjari-jari 20 cm dialiri arus sebesar 0,8 A. Jika toroida mempunyai 50 lilitan, tentukan induksi magnetik pada toroida!

Penyelesaian:

jari-jari, $a = 20 \text{ cm} = 2 \times 10^{-1} \text{ m}$

arus listrik, $I = 0,8 \text{ A}$

banyak lilitan, $N = 50$

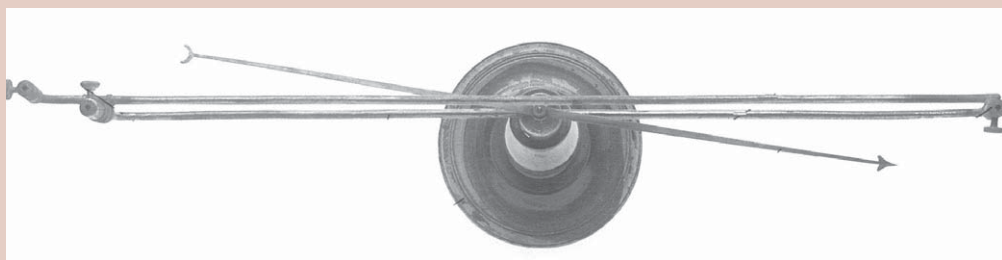
Induksi magnetik pada toroida adalah:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I N}{2\pi a} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(50)}{(2\pi)(2 \times 10^{-1})} \\ &= \frac{4 \times 10^{-6}}{10^{-1}} \\ &= 4 \times 10^{-5} \text{ T} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 5.3

Sebuah toroida memiliki jari-jari 40 cm. Arus listrik sebesar 1,2 A dialirkan ke dalam kumparan tersebut dan menimbulkan induksi magnetik sebesar $18 \times 10^{-6} \text{ T}$. Berapakah jumlah lilitan pada toroida tersebut?

Percikan Fisika



Kompas Oersted

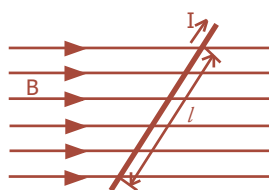
Dalam kuliahnya di Universitas Kopenhagen pada tahun 1820, Oersted menghubungkan baterai dengan sebuah kawat yang bergerak dekat jarum kompas. Jarum magnetik berputar dan Oersted segera tahu apa arti gerakan ini. Kawat yang membawa arus bertindak sebagai magnet, membuktikan hubungan magnetisme dan listrik.



B. Gaya Magnetik (Gaya Lorentz)



Hendrik Antoon Lorentz ahli fisika dari Belanda yang mengemukakan gaya magnetik atau gaya Lorentz.



Gambar 5.7 Kawat yang membawa arus I pada medan magnetik.

Gaya Lorentz merupakan gaya yang bekerja pada sebuah penghantar berarus listrik dalam medan magnet.

1. Gaya Lorentz pada Penghantar Berarus di Medan Magnet

Arus merupakan kumpulan muatan-muatan yang bergerak. Kita telah mengetahui bahwa arus listrik memberikan gaya pada magnet, seperti pada jarum kompas. Eksperimen yang dilakukan Oersted membuktikan bahwa magnet juga akan memberikan gaya pada kawat pembawa arus.

Gambar 5.7 memperlihatkan sebuah kawat dengan panjang l yang mengangkut arus I yang berada di dalam medan magnet B . Ketika arus mengalir pada kawat, gaya diberikan pada kawat. Arah gaya selalu tegak lurus terhadap arah arus dan juga tegak lurus terhadap arah medan magnetik. Besar gaya yang terjadi adalah:

- berbanding lurus dengan arus I pada kawat,
- berbanding lurus dengan panjang kawat l pada medan magnetik,
- berbanding lurus dengan medan magnetik B ,
- berbanding lurus sudut θ antara arah arus dan medan magnetik.

Secara matematis besarnya gaya Lorentz dapat dituliskan dalam persamaan:

$$F = I \cdot l \cdot B \sin \theta \quad (5.22)$$

Apabila arah arus yang terjadi tegak lurus terhadap medan magnet ($\theta = 90^\circ$), maka diperoleh:

$$F_{\text{maks}} = I \cdot l \cdot B \quad (5.23)$$

Tetapi, jika arusnya paralel dengan medan magnet ($\theta = 0^\circ$), maka tidak ada gaya sama sekali ($F = 0$).

2. Gaya Lorentz pada Muatan Listrik yang Bergerak dalam Medan Magnetik

Kawat penghantar yang membawa arus akan mengalami gaya ketika diletakkan dalam suatu medan magnetik, yang besarnya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (5.22). Karena arus pada kawat terdiri atas muatan listrik yang bergerak,

maka berdasarkan penelitian menunjukkan bahwa partikel bermuatan yang bergerak bebas (tidak pada kawat) juga akan mengalami gaya ketika melewati medan magnetik.

Kita dapat menentukan besarnya gaya yang dialami partikel tersebut. Jika N partikel bermuatan q melewati titik tertentu pada saat t , maka akan terbentuk arus:

$$I = \frac{Nq}{t} \dots\dots\dots (5.24)$$

Jika t adalah waktu yang diperlukan oleh muatan q untuk menempuh jarak l pada medan magnet B , maka:

$$l = v \cdot t \dots\dots\dots (5.25)$$

dengan v menyatakan kecepatan partikel. Jadi, dengan menggunakan persamaan (5.22) akan diketahui gaya yang dialami N partikel tersebut, yaitu:

$$\begin{aligned} F &= I \cdot l \cdot B \sin \theta \\ &= \left(\frac{Nq}{t} \right) (vt) B \sin \theta \\ &= NqvB \sin \theta \dots\dots\dots (5.26) \end{aligned}$$

Gaya pada satu partikel diperoleh dengan membagi persamaan (5.26) dengan N , sehingga diperoleh:

$$F = q v B \sin \theta \dots\dots\dots (5.27)$$

Persamaan (5.27) menunjukkan besar gaya pada sebuah partikel bermuatan q yang bergerak dengan kecepatan v pada kuat medan magnetik B , dengan θ adalah sudut yang dibentuk oleh v dan B . Gaya yang paling besar akan terjadi pada saat partikel bergerak tegak lurus terhadap B ($\theta = 90^\circ$), sehingga:

$$F_{\text{maks}} = q \cdot v \cdot B \dots\dots\dots (5.28)$$


Tetapi, ketika partikel bergerak sejajar dengan garis-garis medan ($\theta = 0^\circ$), maka tidak ada gaya yang terjadi.

Arah gaya tegak lurus terhadap medan magnet B dan terhadap partikel v , dan dapat diketahui dengan kaidah tangan kanan.

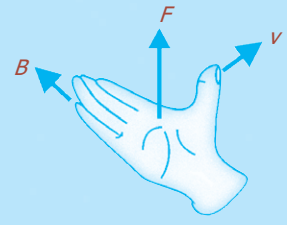
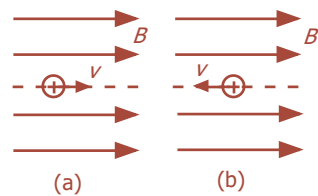
Lintasan yang ditempuh oleh partikel bermuatan dalam medan magnetik tergantung pada sudut yang dibentuk oleh arah kecepatan dengan arah medan magnetik.

a. Garis Lurus (tidak Dibelokkan)

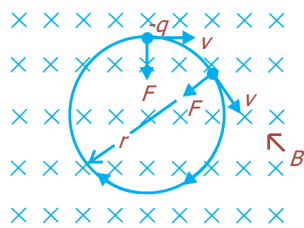
Lintasan berupa garis lurus terbentuk jika arah kecepatan partikel bermuatan sejajar baik searah maupun berlawanan arah dengan medan magnetik. Hal ini menyebabkan tidak ada gaya Lorentz yang terjadi, sehingga gerak partikel tidak dipengaruhi oleh gaya Lorentz. Lintasan gerak terlihat seperti pada Gambar 5.8.



Kaidah tangan kanan menyatakan bahwa arah medan magnetik di sekitar kawat adalah sedemikian sehingga bila tangan kanan dibuka dengan ibu jari menunjukkan arah v , keempat jari lain menunjukkan arah induksi magnetik B , dan arah telapak tangan menunjukkan arah gaya Lorentz F .

Gambar 5.8 Lintasan partikel yang bergerak sejajar dengan garis medan magnetik (a) searah (b) berlawanan arah.



Gambar 5.9 Lintasan melingkar yang dialami muatan $-q$.

b. Lingkaran

Gambar di samping memperlihatkan lintasan yang ditempuh partikel bermuatan negatif yang bergerak dengan kecepatan v ke dalam medan magnet seragam B adalah berupa lingkaran. Kita anggap v tegak lurus terhadap B , yang berarti bahwa v seluruhnya terletak di dalam bidang gambar, sebagaimana ditunjukkan oleh tanda x . Elektron yang bergerak dengan laju konstan pada kurva lintasan, mempunyai percepatan sentripetal:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

Berdasarkan Hukum II Newton, bahwa:

$$F = m \cdot a$$

Maka, dengan menggunakan persamaan (5.28) diperoleh:

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot a$$

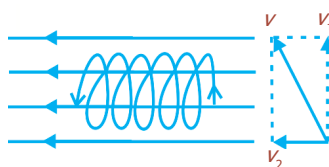
$$qvB = m \frac{v^2}{R} \dots\dots\dots (5.29)$$

$$\text{atau } R = \frac{mv}{q \cdot B} \dots\dots\dots (5.30)$$

Persamaan di atas untuk menentukan jari-jari lintasan (R), dengan m adalah massa partikel, v adalah kecepatan partikel, B menyatakan induksi magnetik, dan q adalah muatan partikel.

c. Spiral

Lintasan melingkar terjadi apabila kecepatan gerak muatan tegak lurus terhadap medan magnetik. Tetapi, jika v tidak tegak lurus terhadap B , maka yang terjadi adalah lintasan spiral. Vektor kecepatan dapat dibagi menjadi komponen-komponen sejajar dan tegak lurus terhadap medan. Komponen yang sejajar terhadap garis-garis medan tidak mengalami gaya, sehingga tetap konstan. Sementara itu, komponen yang tegak lurus dengan medan menghasilkan gerak melingkar di sekitar garis-garis medan. Penggabungan kedua gerakan tersebut menghasilkan gerak spiral (heliks) di sekitar garis-garis medan, seperti yang terlihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Lintasan spiral.

Contoh Soal

1. Suatu kawat berarus listrik 10 A dengan arah ke atas berada dalam medan magnetik 0,5 T dengan membentuk sudut 30° terhadap kawat. Jika panjang kawat 5 meter, tentukan besarnya gaya Lorentz yang dialami kawat!

Penyelesaian:

Diketahui: $I = 10 \text{ A}$ $\alpha = 30^\circ$
 $B = 0,5 \text{ T}$ $l = 5 \text{ m}$

Ditanya: $F = \dots ?$

$$\begin{aligned} F &= I.l.B \sin \alpha \\ &= (0,5)(10)(5) \sin 30^\circ \\ &= 25\left(\frac{1}{2}\right) = 12,5 \text{ newton} \end{aligned}$$

2. Suatu muatan bermassa $9,2 \times 10^{-38} \text{ kg}$ bergerak memotong secara tegak lurus medan magnetik 2 tesla. Jika muatan sebesar $3,2 \times 10^{-9} \text{ C}$ dan jari-jari lintasannya 2 cm, tentukan kecepatan muatan tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 9,2 \times 10^{-38} \text{ kg}$
 $B = 2 \text{ tesla}$
 $q = 3,2 \times 10^{-9} \text{ C}$
 $R = 2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$

Besarnya kecepatan muatan adalah:

$$\begin{aligned} R &= \frac{m.v}{q.B} \\ v &= \frac{R.q.B}{m} \\ &= \frac{(2 \times 10^{-2})(3,2 \times 10^{-9})(2)}{9,2 \times 10^{-28}} = \frac{12,8 \times 10^{-11}}{9,2 \times 10^{-28}} = 1,39 \times 10^{17} \text{ m/s} \end{aligned}$$

3. Gaya Magnetik pada Dua Penghantar Sejajar

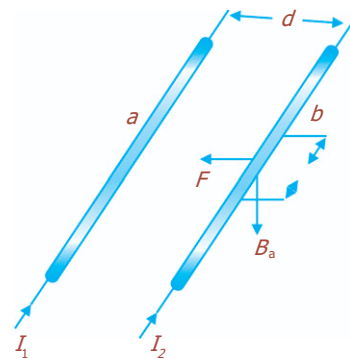
Dua penghantar lurus panjang yang terpisah pada jarak d satu sama lain, dan membawa arus I_1 dan I_2 , diperlihatkan pada Gambar 5.11. Berdasarkan eksperimen, Ampere menyatakan bahwa masing-masing arus pada kawat penghantar menghasilkan medan magnet, sehingga masing-masing memberikan gaya pada yang lain, yang menyebabkan dua penghantar itu saling tarik-menarik.

Apabila arus I_1 menghasilkan medan magnet B_1 yang dinyatakan pada persamaan (5.9), maka besar medan magnet adalah:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi d} \dots\dots\dots (5.31)$$

Berdasarkan persamaan (5.23), gaya F per satuan panjang l pada penghantar yang membawa arus I_2 adalah:

$$\frac{F}{l} = I_2 \cdot B_1 \dots\dots\dots (5.32)$$



Gambar 5.11 Dua kawat sejajar yang mengangkut arus-arus sejajar.

Gaya pada I_2 hanya disebabkan oleh I_1 . Dengan mensubstitusikan persamaan (5.32) ke persamaan (5.31), maka akan diperoleh:

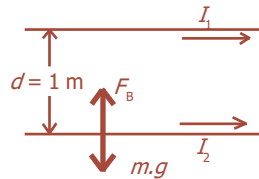
$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} \dots\dots\dots (5.33)$$

Contoh Soal

Dua kawat lurus yang panjangnya 2 m berjarak 1 m satu sama lain. Kedua kawat dialiri arus yang sama besar dan arahnya berlawanan. Jika gaya yang timbul pada kawat $1,5 \times 10^{-7}$ N/m, tentukan kuat arus yang mengalir pada kedua kawat tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $l = 2$ m
 $d = 1$ m
 $F = 1,5 \times 10^{-7}$ N/m
 $I_1 = I_2 = I$



Besarnya kuat arus yang mengalir pada kedua kawat adalah:

$$\begin{aligned} \frac{F}{l} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} \\ F &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{d} l \\ 1,5 \times 10^{-7} &= \frac{(2 \times 10^{-7}) I^2}{1} (2) \\ I^2 &= \frac{1,5 \times 10^{-7}}{4 \times 10^{-7}} \\ I^2 &= 0,375 \text{ A} \\ I &= 0,61 \text{ A} \end{aligned}$$

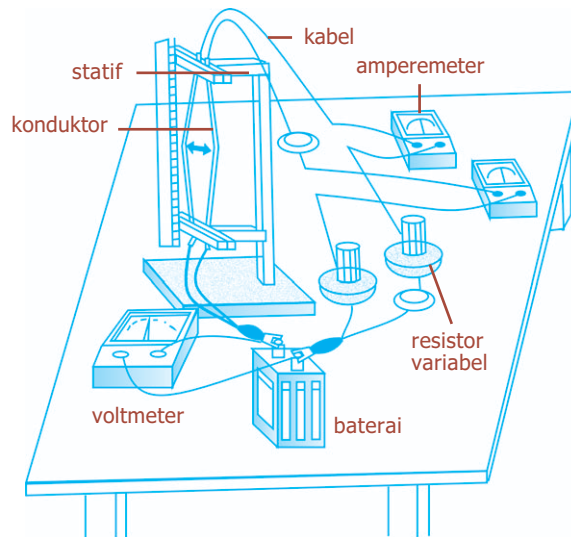
Karena $I = I_1 = I_2$, maka $I_1 = 0,61$ A dan $I_2 = 0,61$ A.

Kegiatan

Tujuan : Memahami terjadinya gaya Lorentz.
 Alat dan bahan : Penjepit kayu, konduktor aluminium foil, kabel penghubung, amperemeter DC, voltmeter, penggaris, resistor variabel, sakelar *on-off*, dan baterai.

Cara Kerja:

1. Dalam kondisi sakelar *off*, rangkailah alat seperti gambar.
2. *On*-kan sakelar dan perhatikan apakah terjadi perubahan pada kedua konduktor pada bagian tengahnya.
3. Ubahlah besar tahanan dengan memutar sedikit resistor variabel sehingga mulai terlihat adanya perubahan fisis Δx pada konduktor lempeng aluminium foil bagian tengahnya itu.



4. Bacalah nilai pembacaan amperemeter I dan voltmeter V .
5. Ukurlah dengan penggaris perubahan fisis jarak antara kedua konduktor bagian tengahnya. Ukurlah pula panjang konduktor l .
6. Ulangilah langkah 3 - 5 untuk berbagai nilai V dan I , serta panjang konduktor.
7. Catatlah data hasil percobaan dengan mengikuti format berikut ini.

No	V (volt)	I (A)	l (m)	Δt (m)	Keterangan

Diskusi:

Apakah yang dapat disimpulkan dari percobaan yang telah kalian lakukan?

Uji Kemampuan 5.4

1. Partikel-partikel alfa ($m_\alpha = 6,68 \times 10^{-27}$ kg, $q = +2e$) dipercepat dari keadaan diam melalui suatu penurunan potensial 1,0 kV. Partikel-partikel tersebut kemudian memasuki medan magnet $B = 0,20$ T yang tegak lurus terhadap arah gerakan partikel-partikel tersebut. Hitunglah jari-jari jalur partikel tersebut!
2. Perhatikan gambar berikut!



Pada gambar di samping, medan magnet ke arah atas keluar halaman dengan $B = 0,80$ T. Kawat mengalirkan arus 30 A. Tentukan besar dan arah gaya pada kawat sepanjang 5 cm!



C. Penerapan Gaya Magnetik

1. Galvanometer

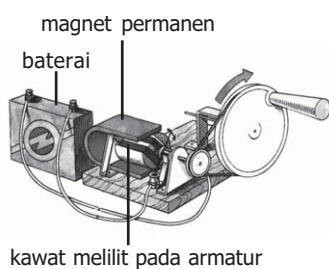


Sumber: *Jendela Iptek Listrik*,
PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 5.12
Galvanometer Tangen.

Galvanometer berperan sebagai komponen dasar pada beberapa alat ukur, antara lain amperemeter, voltmeter, serta ohmmeter. Peralatan ini digunakan untuk mendeteksi dan mengukur arus listrik lemah. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.12, galvanometer berupa kumparan bergerak, terdiri atas sebuah kumparan terbuat dari kawat tembaga isolasi halus dan dapat berputar pada sumbunya yang mengelilingi sebuah inti besi lunak tetap yang berada di antara kutub-kutub suatu magnet permanen. Interaksi antara medan magnetik \mathbf{B} permanen dengan sisi-sisi kumparan akan dihasilkan bila arus I mengalir melaluinya, sehingga akan mengakibatkan torka pada kumparan. Kumparan bergerak memiliki tongkat penunjuk atau cermin yang membelokkan berkas cahaya ketika bergerak, dimana tingkat pembelokan tersebut merupakan ukuran kekuatan arus.

2. Motor Listrik



Gambar 5.13 Motor listrik.

Sebuah motor listrik merupakan alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Mesin ini tidak bising, bersih, dan memiliki efisiensi tinggi. Alat ini bekerja dengan prinsip bahwa arus yang mengalir melalui kumparan di dalam medan magnet akan mengalami gaya yang digunakan untuk memutar kumparan. Pada motor induksi, arus bolak-balik diberikan pada kumparan tetap (stator), yang menimbulkan medan magnetik sekaligus menghasilkan arus di dalam kumparan berputar (*rotor*) yang mengelilinginya. Keuntungan motor jenis ini adalah arus tidak harus diumpankan melalui komutator ke bagian mesin yang bergerak. Pada motor serempak (*synchronous motor*), arus bolak-balik yang hanya diumpankan pada stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar dan terkunci dengan medan rotor. Dalam hal ini magnet bebas, sehingga menyebabkan rotor berputar dengan kelajuan yang sama dengan putaran medan stator. Rotor dapat berupa magnet permanen atau magnet listrik yang diumpani arus searah melalui cincin geser.

3. Relai

Relai merupakan suatu alat dengan sebuah sakelar, untuk menutup relai digunakan magnet listrik.

Arus yang relatif kecil dalam kumparan magnet listrik dapat digunakan untuk menghidupkan arus yang besar tanpa terjadi hubungan listrik antara kedua rangkaian.

4. Kereta “Maglev”

Maglev merupakan kereta api yang menerapkan konsep magnet listrik untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Kata “Maglev” berasal dari *magnetic levitation*. Kereta api ini dipasang magnet listrik di bawahnya yang bergerak pada jalur bermagnet listrik. Magnet tolak-menolak sehingga kereta api melayang tepat di atas jalur lintasan. Gesekan kereta api dengan jalur lintasan berkurang sehingga kereta api bergerak lebih cepat.



Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 5.14 Kereta Maglev.

Fiesta

Fisikawan Kita



Hendrik Antoon Lorentz (1853 - 1928)

Ia adalah ahli fisika dari Belanda. Lahir di Arnhem, 18 Juli 1853 dan meninggal di Haarlem pada tanggal 4 Februari 1928. Tahun 1877 - 1912 menjadi guru besar di Leiden. Bersama P. Zeeman ia menerima hadiah nobel pada tahun 1902 dalam penyelidikan mereka tentang pengaruh magnet pada sinar. Sumbangan Lorentz pada fisika antara lain elektromagnet, teori relativitas, gaya berat, termodinamika, radiasi, teori kinetik gas, dan fisika kuantum.

Karya-karyanya antara lain *Oven de Moleculaire Theorieen in de Natuurkunde* (1878), *Leerboek der differentiaalen Integraalrekening* (1882), dan *La Theorie Electromagnetique de Maxwell et Son Application aux Corps Mouvants* (1892).

Percikan Fisika

Video Recorder



Pada video recorder, sinyal disimpan di dalam pita magnetik. Video recorder sangat tergantung pada magnetisme dan listrik. Ia menggunakan dorongan magnetik dari kawat yang membawa arus dalam motor listrik untuk memutar drum pada kecepatan tinggi dan menggerakkan pita yang melaluinya dengan lembut. Untuk merekam suatu program, arus yang mengalir melalui kumparan kawat di dalam drum digunakan untuk menciptakan pola magnetik pada pita. Jika pita tersebut diputar ulang, alat perekam menggunakan pola magnetik ini untuk menghasilkan arus yang dapat diubah ke dalam gambar.

- * Medan magnetik adalah ruang di sekitar magnet yang masih terpengaruh gaya magnet.
- * Hukum Biot-Savart dirumuskan sebagai berikut:

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$$

- * Besar induksi magnetik yang dihasilkan oleh beberapa penghantar.
- Penghantar lurus berarus:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

- Penghantar melingkar berarus
- Jika di pusat lingkaran:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

Jika penghantar terdiri atas N lilitan:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2a}$$

- Pada solenoida

Di pusat sumbu solenoida: $B = \mu_0 In$

Di ujung sumbu solenoida: $B = \frac{\mu_0 In}{2}$

dengan n = jumlah lilitan per satuan panjang $n = \frac{N}{l}$

- Pada toroida: $B = \frac{\mu_0 IN}{2\pi a}$

- * Gaya Lorentz adalah gaya yang terjadi akibat interaksi antara medan magnetik dengan arus listrik.

- Gaya Lorentz pada penghantar berarus

$$F = I l B \sin \theta$$

- Gaya Lorentz pada muatan listrik yang bergerak

$$F = q v B \sin \theta$$

- * Jari-jari lintasan muatan yang bergerak

$$R = \frac{mv}{qB}$$

- * Gaya magnetik pada dua kawat sejajar berarus listrik

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} l$$

- * Aplikasi gaya Lorentz:
 - galvanometer,
 - motor listrik,
 - relai,
 - kereta Maglev.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Besar kuat medan magnetik di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus I adalah sebanding dengan
 - a. I
 - b. rI
 - c. r/I
 - d. I/r
 - e. I/Rr
2. Arus listrik mengalir di sepanjang kawat listrik tegangan tinggi dari Selatan ke Utara. Arah medan magnetik yang diakibatkan arus listrik di atas kawat tersebut adalah
 - a. Tenggara
 - b. Barat
 - c. Timur
 - d. Utara
 - e. Selatan
3. Sebuah kawat berbentuk lingkaran dengan jari-jari R dialiri arus listrik I , besarnya kuat medan magnetik pada pusat lingkaran adalah
 - a. tidak tergantung pada R
 - b. sebanding dengan R^2
 - c. berbanding terbalik dengan R
 - d. berbanding lurus dengan R
 - e. berbanding terbalik dengan R^2

4. Dari hasil pengukuran diketahui besar induksi magnetik di ujung suatu solenoida adalah $1,8 \times 10^{-3}$ T. Maka besar induksi magnetik di pusat solenoida adalah
- $0,9 \times 10^{-3}$ T
 - $1,2 \times 10^{-3}$ T
 - $1,8 \times 10^{-3}$ T
 - $2,4 \times 10^{-3}$ T
 - $3,6 \times 10^{-3}$ T
5. Suatu solenoida yang terdiri dari 1.200 lilitan kawat dialiri arus 20 A. Apabila induksi magnetik di pusat solenoida 4×10^{-2} T, maka panjang solenoida tersebut adalah
- 48 cm
 - 36 cm
 - 30 cm
 - 24 cm
 - 20 cm
6. Sebuah toroida dengan jari-jari 20 cm dialiri arus 5 A. Jika induksi magnetik yang timbul pada sumbu toroida tersebut adalah $1,8 \times 10^{-4}$ T, maka jumlah lilitan toroida adalah
- 9
 - 18
 - 24
 - 36
 - 62
7. Sebuah partikel bermuatan $q = 2,5 \times 10^{-8}$ C yang massanya $m = 0,5$ gram bergerak dengan kecepatan $v = 6 \times 10^4$ m/s, menembus tegak lurus medan magnet homogen. Apabila partikel tetap bergerak dengan arah horizontal, maka besar medan magnetik tersebut adalah
- 1,27 T
 - 2,27 T
 - 3,00 T
 - 3,07 T
 - 3,27 T
8. Dua kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik sama besar terjadi gaya yang besarnya 2×10^{-7} N. Jika jarak antara kedua kawat adalah 1 m, maka arus listrik yang mengalir dalam setiap kawat adalah
- 2 A
 - 1 A
 - 0,5 A
 - 0,25 A
 - 0,125 A

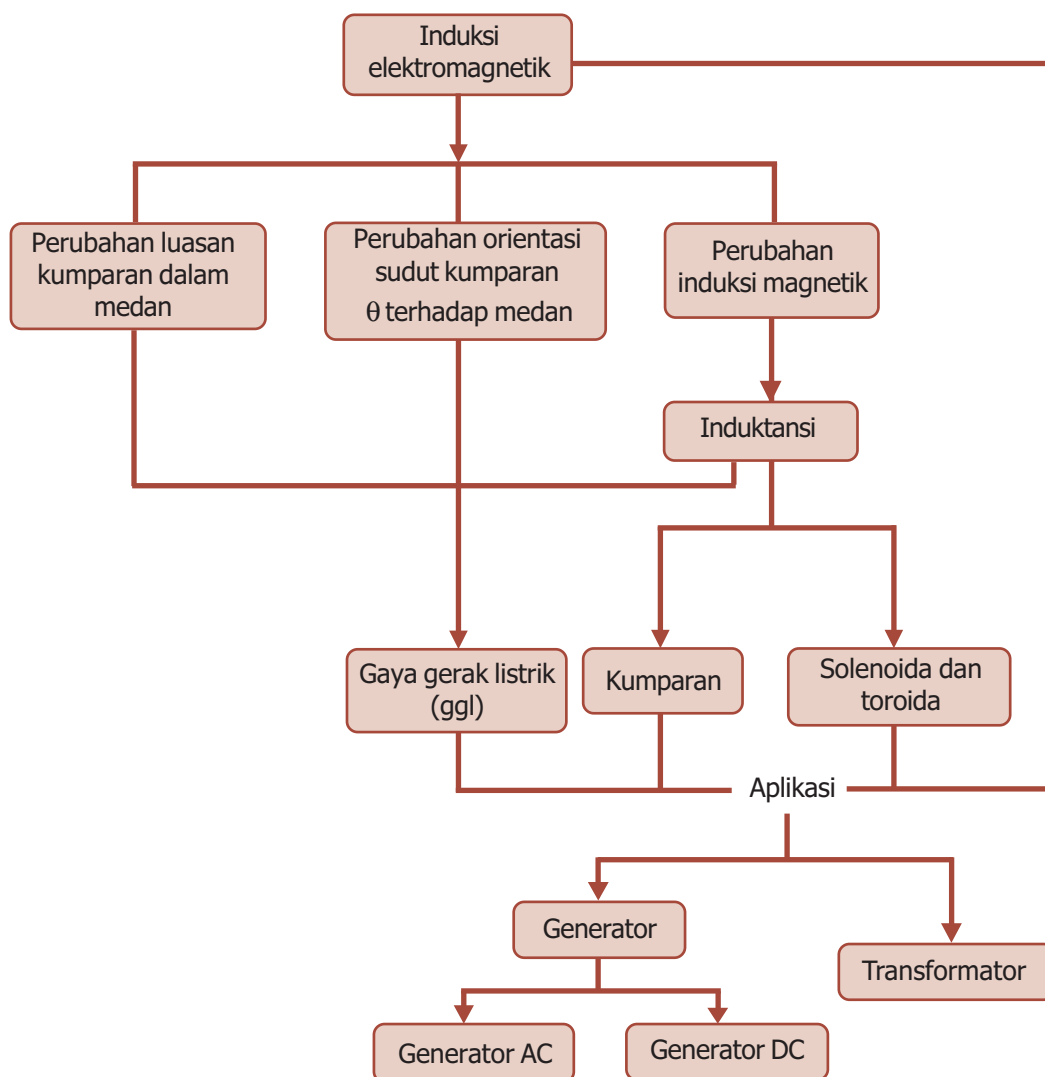
9. Besar gaya yang dialami seutas kawat berarus listrik tidak tergantung pada ...
 - a. posisi kawat dalam medan magnetik
 - b. panjang kawat
 - c. hambatan kawat
 - d. kuat arusnya
 - e. kuat medan magnetnya
10. Jika dua kawat lurus sejajar dialiri arus listrik masing-masing I_1 dan I_2 ($I_2 = 2I_1$), maka gaya interaksi tiap satuan panjang kawat pertama adalah
 - a. $\frac{1}{2}$ kali gaya interaksi pada kawat kedua
 - b. sama dengan gaya interaksi pada kawat kedua
 - c. 2 kali gaya interaksi pada kawat kedua
 - d. $\frac{1}{4}$ kali gaya interaksi pada kawat kedua
 - e. 4 kali gaya interaksi pada kawat kedua

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Hitunglah besar induksi magnetik sebuah titik yang berada pada jarak 10 cm dari pusat sebuah penghantar lurus berarus listrik 50 A!
2. Sebuah solenoida mempunyai panjang 1 m dan diameter 10 cm. Solenoida tersebut terdiri atas 200 lilitan dan dialiri arus sebesar 10 A. Tentukan:
 - a. induksi magnetik di ujung solenoida,
 - b. induksi magnetik di pusat solenoida!
3. Elektron yang bergerak dengan kecepatan 5×10^4 m/s sejajar dengan kawat yang berarus 10 A. Pada jarak 1 cm dari kawat, tentukan besar gaya yang terjadi!
4. Seutas kawat yang panjangnya 10 m dialiri arus listrik sebesar 50 A. Kawat diletakkan di dalam medan magnet homogen yang membentuk sudut 30° terhadap kawat. Jika gaya pada kawat 25 N, tentukan induksi magnetiknya!
5. Dua kawat panjang dan sejajar terpisah sejauh 0,5 m satu sama lain. Kedua kawat tersebut dialiri arus yang searah masing-masing 10 A dan 30 A. Tentukan gaya yang bekerja pada kedua kawat per 1 m panjang kawat!

PETA KONSEP

Bab 6 Induksi Elektromagnetik





- Pesawat telepon memanfaatkan induksi elektromagnetik.

Sumber: *Dokumen Penerbit*, 2006

Telepon adalah sarana telekomunikasi yang sangat populer digunakan saat ini. Dengan menggunakan telepon, maka kalian dapat mengirimkan dan menerima pesan berupa suara, walaupun pada jarak yang berjauhan. Pada umumnya, telepon dihubungkan dengan jaringan telepon lewat kabel. Dengan adanya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, kini telepon secara praktis dapat dibawa ke mana-mana dan dihubungkan dengan jaringan melalui gelombang radio. Tahukah kalian prinsip kerja telepon itu? Ternyata, telepon menggunakan prinsip induksi elektromagnetik dalam penerapannya. Tahukah kalian yang dimaksud induksi elektromagnetik? Nah, untuk mengetahuinya, ikutilah pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

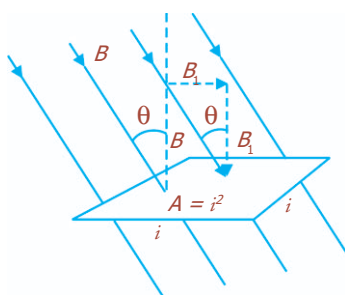
arus induksi, ggl induksi, induktansi, konduktor, medan magnetik



A. Ggl Induksi

BETA[®] Berita Fisika

Michael Faraday adalah ahli fisika dan kimia dari Inggris. Penemuannya antara lain benzen, induksi elektromagnetik, hukum elektrolisis, pengaruh zantara terhadap gejala elektrostatika dan efek Faraday.



Gambar 6.1 Garis medan magnetik yang menembus luas permukaan A .

Induksi elektromagnetik adalah gejala timbulnya gaya gerak listrik di dalam suatu kumparan/konduktor bila terdapat perubahan fluks magnetik pada konduktor tersebut atau bila konduktor bergerak relatif melintasi medan magnetik.

Gaya gerak listrik induksi adalah timbulnya gaya gerak listrik di dalam kumparan yang mencakup sejumlah fluks garis gaya medan magnetik, bilamana banyaknya fluks garis gaya itu divariasi. Dengan kata lain, akan timbul gaya gerak listrik di dalam kumparan apabila kumparan itu berada di dalam medan magnetik yang kuat medannya berubah-ubah terhadap waktu.

1. Hukum Faraday

Konsep gaya gerak listrik pertama kali dikemukakan oleh Michael Faraday, yang melakukan penelitian untuk menentukan faktor yang memengaruhi besarnya ggl yang diinduksi. Dia menemukan bahwa induksi sangat bergantung pada waktu, yaitu semakin cepat terjadinya perubahan medan magnetik, ggl yang diinduksi semakin besar. Di sisi lain, ggl tidak sebanding dengan laju perubahan medan magnetik B , tetapi sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik, Φ_B , yang bergerak melintasi loop seluas A , yang secara matematis fluks magnetik tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$\Phi = B.A \cos \theta \dots\dots\dots (6.1)$$

Dengan B sama dengan rapat fluks magnetik, yaitu banyaknya fluks garis gaya magnetik per satuan luas penampang yang ditembus garis gaya fluks magnetik tegak lurus, dan θ adalah sudut antara B dengan garis yang tegak lurus permukaan kumparan. Jika permukaan kumparan tegak lurus B , $\theta = 90^\circ$ dan $\Phi_B = 0$, tetapi jika B sejajar terhadap kumparan, $\theta = 0^\circ$, sehingga:

$$\Phi_B = B.A \dots\dots\dots (6.2)$$

Hal ini terlihat pada Gambar 6.1, di mana kumparan berupa bujur sangkar bersisi i seluas $A = i^2$. Garis B dapat digambarkan sedemikian rupa sehingga jumlah garis per satuan luas sebanding dengan kuat medan. Jadi, fluks Φ_B dapat dianggap sebanding dengan jumlah garis yang

melewati kumparan. Besarnya fluks magnetik dinyatakan dalam satuan weber (Wb) yang setara dengan tesla.meter² (1Wb = 1 T.m²).

Dari definisi fluks tersebut, dapat dinyatakan bahwa jika fluks yang melalui loop kawat penghantar dengan N lilitan berubah sebesar $\Delta\Phi_B$ dalam waktu Δt , maka besarnya ggl induksi adalah:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.3)$$

Yang dikenal dengan Hukum Induksi Faraday, yang berbunyi: *“gaya gerak listrik (ggl) induksi yang timbul antara ujung-ujung suatu loop penghantar berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar tersebut”*. Tanda negatif pada persamaan (6.3) menunjukkan arah ggl induksi. Apabila perubahan fluks ($\Delta\Phi$) terjadi dalam waktu singkat ($\Delta t \rightarrow 0$), maka ggl induksi menjadi:

$$\varepsilon = N \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi_B}{dt} \dots\dots\dots (6.4)$$

dengan:

- ε = ggl induksi (volt)
- N = banyaknya lilitan kumparan
- $\Delta\Phi_B$ = perubahan fluks magnetik (weber)
- Δt = selang waktu (s)

2. Hukum Lenz

Apabila ggl induksi dihubungkan dengan suatu rangkaian tertutup dengan hambatan tertentu, maka mengalirlah arus listrik. Arus ini dinamakan dengan arus induksi. Arus induksi dan ggl induksi hanya ada selama perubahan fluks magnetik terjadi.

Hukum Lenz menjelaskan mengenai arus induksi, yang berarti bahwa hukum tersebut berlaku hanya kepada rangkaian penghantar yang tertutup. Hukum ini dinyatakan oleh Heinrich Friedrich Lenz (1804 - 1865), yang sebenarnya merupakan suatu bentuk hukum kekekalan energi.

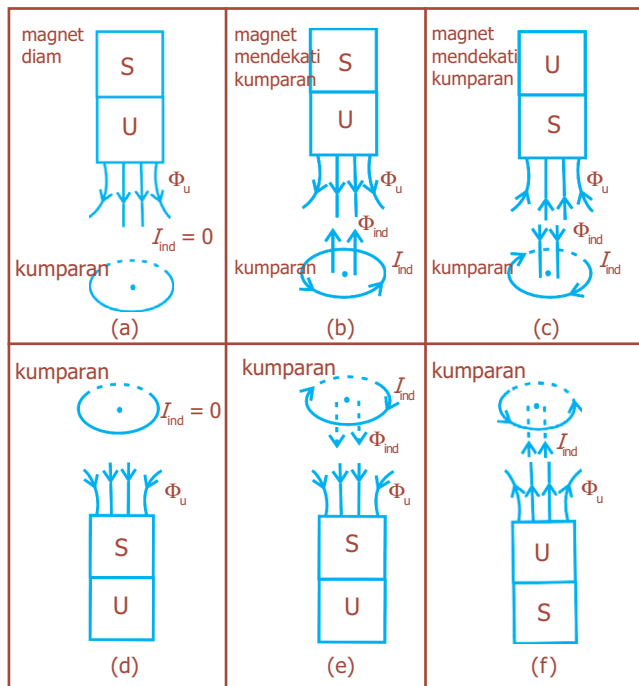
Hukum Lenz menyatakan bahwa:

“ggl induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetnya berlawanan dengan asal perubahan fluks”.

Perubahan fluks akan menginduksi ggl yang menimbulkan arus di dalam kumparan, dan arus induksi ini membangkitkan medan magnetnya sendiri.



Heinrich Friedrich Emil Lenz, ahli fisika dari Italia menemukan kaidah/hukum Lenz tentang arah arus induksi (1835).



Gambar 6.2 Penerapan Hukum Lenz pada arah arus induksi.

Gambar 6.2 menunjukkan penerapan Hukum Lenz pada arah arus induksi. Pada Gambar 6.2(a) dan 6.2(d), magnet diam sehingga tidak ada perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh kumparan. Pada Gambar 6.2(b) menunjukkan fluks magnetik utama yang menembus kumparan dengan arah ke bawah akan bertambah pada saat kutub utara magnet didekatkan kumparan. Arah induksi pada Gambar 6.2(c), 6.2(e), dan 6.2(f), juga dapat diketahui dengan menerapkan Hukum Lenz.

Contoh Soal

Fluks magnetik yang dilingkupi oleh suatu kumparan berkurang dari 0,5 Wb menjadi 0,1 Wb dalam waktu 5 sekon. Kumparan terdiri atas 200 lilitan dengan hambatan $4 \, \Omega$. Berapakah kuat arus listrik yang mengalir melalui kumparan?

Penyelesaian:

Diketahui: $\Phi_1 = 0,5 \, \text{Wb}$
 $\Phi_2 = 0,1 \, \text{Wb}$
 $N = 200$ lilitan
 $R = 4 \, \Omega$
 $\Delta t = 5$ sekon

Ditanya: $I \dots ?$

Jawab:

Ggl induksi dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \\ &= -200 \frac{(0,5 - 0,1)}{5} = -200 \frac{(0,4)}{5} = -16 \, \text{volt} \end{aligned}$$

tanda (-) menyatakan reaksi atas perubahan fluks, yaitu fluks induksi berlawanan arah dengan fluks magnetik utama. Arus yang mengalir melalui kumparan adalah:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{16}{4} = 4 \, \text{A}$$

Uji Kemampuan 6.1

1. Sebuah kumparan memiliki 80 lilitan, fluks magnetiknya mengalami peningkatan dari $1,40 \times 10^{-3}$ Wb menjadi $4,8 \times 10^{-2}$ Wb dalam waktu 0,8 s. Tentukan ggl induksi rata-rata dalam kumparan tersebut!
2. Sebuah kumparan memiliki hambatan 12 ohm, diletakkan dalam fluks magnetik yang berubah terhadap waktu, yang dinyatakan dalam $\phi = (3t - 8)^3$, dengan ϕ dalam Wb dan t dalam sekon. Berapakah arus yang mengalir dalam kawat pada $t = 4$ s?

3. Faktor-Faktor Penyebab Timbulnya Ggl Induksi

Penyebab utama timbulnya ggl induksi adalah terjadinya perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh suatu loop kawat. Besarnya fluks magnetik telah dinyatakan pada persamaan (6.1). Dengan demikian, ada tiga faktor penyebab timbulnya ggl pada suatu kumparan, yaitu:

- a. perubahan luas bidang kumparan (A),
- b. perubahan orientasi sudut kumparan θ terhadap medan,
- c. perubahan induksi magnetik.

a. Ggl Induksi akibat Perubahan Luasan Kumparan dalam Medan

Gambar 6.3 memperlihatkan induksi ggl elektro-magnetik. Kita asumsikan medan \mathbf{B} tegak lurus terhadap permukaan yang dibatasi sebuah konduktor berbentuk U. Sebuah konduktor lain yang dapat bergerak dengan kecepatan v dipasang pada konduktor U. Dalam waktu Δt konduktor yang bergerak tersebut menempuh jarak:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

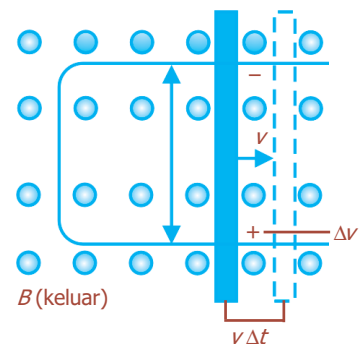
Sehingga, luas bidang kumparan bertambah sebesar:

$$\Delta A = l \cdot \Delta x = l \cdot v \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

Berdasarkan Hukum Faraday, akan timbul ggl induksi yang besarnya dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = \frac{B \cdot \Delta A}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (6.7)$$



Gambar 6.3 Perubahan luasan kumparan karena pergerakan batang penghantar pada konduktor U.

Dengan substitusi persamaan (6.6), maka akan diperoleh:

$$\varepsilon = \frac{B.l.v.\Delta t}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.8)$$

$$\varepsilon = B.l.v \dots\dots\dots (6.9)$$

Persamaan (6.9) hanya berlaku pada keadaan B , l , dan v saling tegak lurus.

Contoh Soal

Sebuah kawat yang panjangnya 2 m bergerak tegak lurus pada medan magnetik dengan kecepatan 12 m/s, pada ujung-ujung kawat timbul beda potensial 1,8 V. Tentukan besarnya induksi magnetik!

Penyelesaian:

Diketahui: $l = 2$ m; $v = 12$ m/s; $\varepsilon = 1,8$ volt

Ditanya: $B = \dots ?$

Jawab:

Karena $V \perp B$, maka besar induksi magnetiknya adalah:

$$\varepsilon = B.l.v$$

$$1,8 = B \times 2 \times 12$$

$$1,8 = 24 B$$

$$B = \frac{1,8}{24}$$

$$B = 0,075 \text{ T}$$

b. Ggl Induksi Akibat Perubahan Orientasi Sudut Kumparan θ terhadap Medan

Perubahan sudut antara induksi magnetik B dan arah bidang normal dapat menyebabkan timbulnya ggl induksi, yang besarnya dapat ditentukan melalui persamaan (6.4).

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N \frac{d\Phi_B}{dt} \\ &= -N \frac{d}{dt} (BA \cos \theta) \end{aligned}$$

Karena nilai B dan A konstan, maka akan diperoleh:

$$\varepsilon = -NBA \frac{d \cos \theta}{dt} \dots\dots\dots (6.10)$$

Jika laju perubahan $\cos \theta$ tetap, persamaan (6.10) menjadi:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -NBA \frac{\Delta(\cos \theta)}{\Delta t} \\ \varepsilon &= -NBA \left[\frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_1}{t_2 - t_1} \right] \dots\dots\dots (6.11) \end{aligned}$$

Dengan θ_1 dan θ_2 masing-masing menyatakan sudut awal dan sudut akhir antara arah normal bidang dengan arah induksi.

Uji Kemampuan 6.2

Suatu batang konduktor meluncur pada rel yang berada dalam suatu medan magnetik dengan kecepatan 8 m/s. Induksi magnetik yang terjadi sebesar 0,6 T. Panjang penghantar tersebut 15 cm, dan hambatan total rangkaiannya 25Ω . Jika dianggap bahwa tahanan batang dan relnya dapat diabaikan, tentukan:

- ggl induksi dalam rangkaian,
- arus dalam rangkaian,
- gaya yang dibutuhkan untuk menggerakkan batang tadi dengan kecepatan konstan!

c. Ggl Induksi Akibat Perubahan Induksi Magnetik

Perubahan induksi magnetik juga dapat menimbulkan ggl induksi pada luasan bidang kumparan yang konstan, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\epsilon &= -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d}{dt}(BA \cos \theta) \\ \epsilon &= -NA \cos \theta \frac{dB}{dt} \dots\dots\dots (6.12)\end{aligned}$$

Untuk laju perubahan induksi magnetik tetap, persamaan (6.12) menjadi:

$$\epsilon = -NA \cos \theta \frac{\Delta B}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.13)$$

$$\epsilon = -NA \cos \theta \left(\frac{B_2 - B_1}{t_2 - t_1} \right) \dots\dots\dots (6.14)$$

Contoh Soal

Medan magnet $B = (5\sqrt{2} \sin 20t)$ tesla menembus tegak lurus kumparan seluas 100 cm^2 yang terdiri atas 50 lilitan dan hambatan kumparan 5 ohm. Berapakah kuat arus induksi maksimum yang timbul pada kumparan?

Penyelesaian:

$$\begin{aligned}\text{Diketahui: } B &= 5\sqrt{2} \sin 20t & N &= 50 \\ A &= 100 \text{ cm}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2 & R &= 5 \Omega\end{aligned}$$

Ditanya: $I_{\text{maksimum}} = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\epsilon &= -NA \frac{dB}{dt} = (-50)(10^{-2}) \frac{d}{dt}(5\sqrt{2} \sin 20t) = -(50 \times 10^{-2})(100\sqrt{2}) \cos 20t \\ &= -(5 \times 10^{-1})(100\sqrt{2}) \cos 20t = -50\sqrt{2} \cos 20t\end{aligned}$$

ϵ bernilai maksimum, jika $\cos 20t = 1$, sehingga:

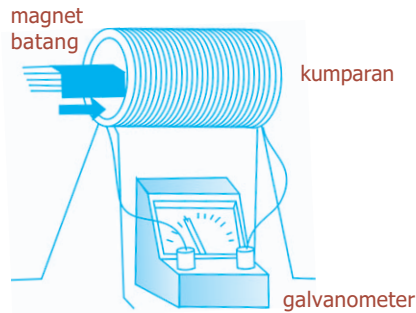
$$\epsilon_{\text{maksimum}} = -50\sqrt{2} \text{ volt, maka akan diperoleh:}$$

$$I_{\text{maks}} = \frac{\epsilon_{\text{maks}}}{R} = \frac{50\sqrt{2}}{5} = 10\sqrt{2} \text{ A}$$

Kegiatan

Tujuan : Memahami terjadinya induksi elektromagnetik.
 Alat dan bahan : Magnet batang, kumparan, galvanometer.

Cara Kerja:



1. Ambillah sebuah kumparan dan hubungkan di antara kedua ujung kawat kumparan dengan sebuah galvanometer.
2. Ambillah sebuah magnet batang yang cukup kuat kemagnetannya.
3. Gerakkan magnet ke dalam kumparan dan amatilah jarum galvanometer.
4. Gerakkan magnet ke luar kumparan dan amatilah kembali jarum galvanometer.
5. Gerakkan magnet maju mundur dan amatilah kondisi jarum galvanometer.
6. Catatlah hasil percobaan dengan mengikuti format berikut ini.

No	Kondisi Magnet	Keadaan Jarum Galvanometer
1.	Magnet masuk kumparan	
2.	Magnet keluar kumparan	
3.	Magnet keluar masuk kumparan	

Diskusi:

1. Jelaskan yang dimaksud induksi elektromagnetik!
2. Bagaimana frekuensi arus bolak-balik ketika magnet keluar masuk kumparan?
3. Tulislah kesimpulan dari percobaan yang telah kalian lakukan!

Uji Kemampuan 6.3

Sebuah kumparan dengan jari-jari 2 cm mempunyai 400 lilitan dan ditempatkan dalam suatu medan magnetik yang berubah terhadap waktu menurut persamaan $B = 0,02t + (4 \times 10^{-4})t^2$, dengan B dalam tesla dan t dalam sekon. Apabila kumparan tersebut dihubungkan ke resistor 400 ohm dan bidang kumparan tegak lurus pada medan magnetik, hitunglah:

- a. besar ggl induksi dalam kumparan sebagai fungsi waktu,
- b. arus listrik dalam resistor pada $t = 8$ s (hambatan kumparan diabaikan)!



B. Aplikasi Induksi Elektromagnetik

1. Generator

Generator adalah alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya adalah peristiwa induksi elektromagnetik. Jika kumparan penghantar digerakkan di dalam medan magnetik dan memotong medan magnetik, maka pada kumparan terjadi ggl induksi. Hal ini dapat dilakukan dengan memutar kawat di dalam medan magnet homogen.

a. Generator AC

Gambar 6.4 menunjukkan skema sebuah generator AC, yang memiliki beberapa kumparan yang dililitkan pada anker yang dapat bergerak dalam medan magnetik. Sumber diputar secara mekanis dan ggl diinduksi pada kumparan yang berputar. Keluaran dari generator tersebut berupa arus listrik, yaitu arus bolak-balik. Skema induksi gaya gerak listrik dapat diamati pada Gambar 6.5, yang menunjukkan kecepatan sesaat sisi a - b dan c - d, ketika loop diputar searah jarum jam di dalam medan magnet seragam B . Ggl hanya dibangkitkan oleh gaya-gaya yang bekerja pada bagian a - b dan c - d. Dengan menggunakan kaidah tangan kanan, dapat ditentukan bahwa arah arus induksi pada a - b mengalir dari a ke b. Sementara itu, pada sisi c - d, aliran dari c ke d, sehingga aliran menjadi kontinu dalam loop. Berdasarkan persamaan (6.9), besarnya ggl yang ditimbulkan dalam a - b adalah:

$$\varepsilon = B.l.v$$

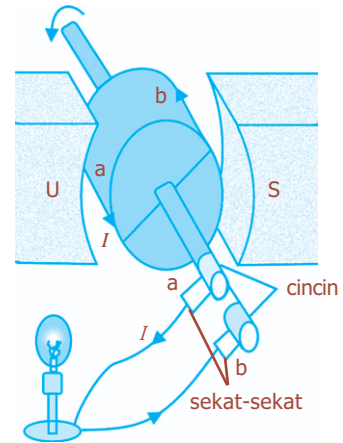
Persamaan tersebut berlaku jika komponen v tegak lurus terhadap B . Panjang a - b dinyatakan oleh l . Dari gambar diperoleh $v = v \sin \theta$, dengan θ merupakan sudut antara permukaan kumparan dengan garis vertikal. Resultan ggl yang terjadi merupakan jumlah ggl terinduksi di a - b dan c - d, yang memiliki besar dan arah yang sama, sehingga diperoleh:

$$\varepsilon = 2N.B.l.v \sin \theta \quad \text{..... (6.15)}$$

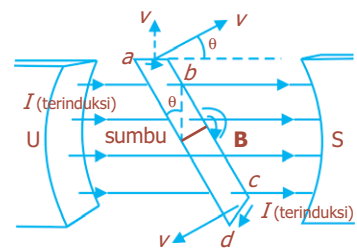
Dengan N merupakan jumlah loop dalam kumparan. Apabila kumparan berputar dengan kecepatan angular konstan ω , maka besar sudutnya adalah $\theta = \omega t$. Diketahui bahwa:

$$v = \omega.r \text{ atau } v = \omega \left(\frac{h}{2} \right)$$

dengan h adalah panjang b - c atau a - d.



Gambar 6.4 Generator AC.



Gambar 6.5 Ggl diinduksi pada potongan a - b dan c - d.



Sumber: *Ensiklopedia Iptek*, PT Lentera Abadi, 2005

Gambar 6.6 Generator pada pembangkit listrik.

Jadi, dari persamaan (6.15) diperoleh:

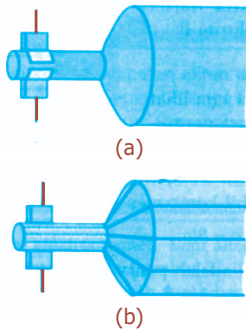
$$\varepsilon = 2N.B.l.\omega \left(\frac{b}{2}\right) \sin \omega t \dots\dots\dots (6.16)$$

atau

$$\varepsilon = N.B.A.\omega \sin \omega t \dots\dots\dots (6.17)$$

Dengan A menyatakan luas loop yang nilainya setara dengan lb . Harga ε maksimum bila $\omega t = 90^\circ$, sehingga $\sin \omega t = 1$. Jadi,

$$\varepsilon_{\text{maksimum}} = N.B.A.\omega \dots\dots\dots (6.18)$$



Gambar 6.7 Generator DC, (a) dengan satu set komutator, (b) dengan banyak komutator.

b. Generator DC

Generator DC hampir sama seperti generator AC. Perbedaannya terletak pada cincin komutator yang digunakannya, yang ditunjukkan pada Gambar 6.7(a). Keluaran generator dapat ditunjukkan oleh grafik hubungan V terhadap t , dan dapat diperhalus dengan memasang kapasitor secara paralel pada keluarannya. Atau dengan menggunakan beberapa kumparan pada angker, sehingga dihasilkan keluaran yang lebih halus Gambar 6.7(b).

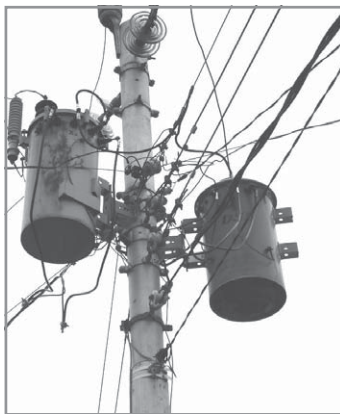
Generator elektromagnetik merupakan sumber utama listrik dan dapat digerakkan oleh turbin uap, turbin air, mesin pembakaran dalam, kincir angin, atau bagian dari mesin lain yang bergerak. Pada pembangkit tenaga listrik, generator menghasilkan arus bolak-balik dan sering disebut *alternator*.

2. Transformator

Transformator merupakan alat yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan AC. Piranti ini memindahkan energi listrik dari suatu rangkaian arus listrik bolak-balik ke rangkaian lain diikuti dengan perubahan tegangan, arus, fase, atau impedansi.

Transformator terdiri atas dua kumparan kawat yang membungkus inti besi, yaitu kumparan primer dan sekunder. Transformator dirancang sedemikian rupa sehingga hampir seluruh fluks magnet yang dihasilkan arus pada kumparan primer dapat masuk ke kumparan sekunder.

Ada dua macam transformator, yaitu *transformator step-up* dan *transformator step-down*. Transformator step-up digunakan untuk memperbesar tegangan arus bolak-balik. Pada transformator ini jumlah lilitan sekunder (N_s) lebih banyak daripada jumlah lilitan primer (N_p). Transformator step-down digunakan untuk menurunkan tegangan listrik arus bolak-balik, dengan jumlah lilitan primer (N_p) lebih banyak daripada jumlah lilitan sekunder (N_s).



Sumber: Dokumen Penerbit, 2006

Gambar 6.8 Transformator pada sebuah tiang listrik.

Apabila tegangan bolak-balik diberikan pada kumparan primer, perubahan medan magnetik yang dihasilkan akan menginduksi tegangan bolak-balik berfrekuensi sama pada kumparan sekunder. Tetapi, tegangan yang timbul berbeda, sesuai dengan jumlah lilitan pada tiap kumparan. Berdasarkan Hukum Faraday, bahwa tegangan atau ggl terinduksi pada kumparan sekunder adalah:

$$V_s = N_s \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Dengan N_s menyatakan banyaknya lilitan pada kumparan sekunder, sedangkan $\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$ adalah laju perubahan fluks magnetik. Tegangan masukan pada kumparan primer juga memenuhi hubungan persamaan dengan laju perubahan fluks magnetik, yaitu:

$$V_p = N_p \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Dengan menganggap tidak ada kerugian daya di dalam inti, maka dari kedua persamaan tersebut akan diperoleh:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \dots\dots\dots (6.19)$$

Persamaan (6.19) adalah persamaan umum transformator, yang menunjukkan bahwa tegangan sekunder berhubungan dengan tegangan primer.

Hukum Kekekalan Energi menyatakan bahwa daya keluaran tidak bisa lebih besar dari daya masukan. Daya masukan pada dasarnya sama dengan daya keluaran. Daya $P = VI$, sehingga diperoleh:

$$V_p I_p = V_s I_s \dots\dots\dots (6.20)$$

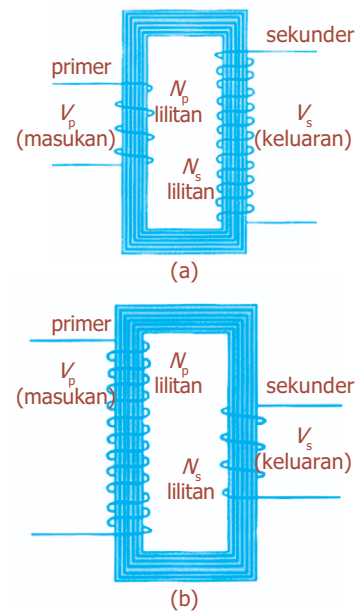
atau

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \dots\dots\dots (6.21)$$

Jadi, pada transformator berlaku hubungan:

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s} \dots\dots\dots (6.22)$$

Transformator ideal (efisiensi $\eta = 100\%$) adalah transformator yang dapat memindahkan energi listrik dari kumparan primer ke kumparan sekunder dengan tidak ada energi yang hilang. Namun, pada kenyataannya, terdapat hubungan magnetik yang tidak lengkap antarkumparan, dan terjadi kerugian pemanasan di dalam kumparan itu sendiri,



Gambar 6.9 Transformator
(a) step-up, (b) step-down.

sehingga menyebabkan daya output lebih kecil dari daya input. Perbandingan antara daya output dan input dinyatakan dalam konsep efisiensi, yang dirumuskan:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% = \frac{V_s \cdot I_s}{V_p \cdot I_p} \times 100\% \dots\dots\dots (6.23)$$



Sumber: *Jendela Iptek Listrik*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 6.10 Jaringan listrik.

Transformator berperan penting dalam transmisi listrik. Listrik yang dihasilkan generator di dalam pembangkit mencapai rumah-rumah melalui suatu jaringan kabel atau “jaringan listrik”. Hambatan menyebabkan sebagian daya hilang menjadi panas. Untuk menghindari hal tersebut, listrik didistribusikan pada tegangan tinggi dan arus yang rendah untuk memperkecil hilangnya daya. Pusat pembangkit mengirim listrik ke gardu-gardu induk, di mana transformator step-up menaikkan tegangan untuk distribusi. Sementara itu, pada gardu-gardu step-down, tegangan dikurangi oleh transformator untuk memasok tegangan yang sesuai baik untuk industri maupun perumahan.

Contoh Soal

1. Sebuah generator armaturnya berbentuk bujur sangkar dengan sisi 8 cm dan terdiri atas 100 lilitan. Jika armaturnya berada dalam medan magnet 0,50 T, berapakah frekuensi putarnya supaya menimbulkan tegangan maksimum 20 volt?

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } A &= 8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} = 64 \text{ cm}^2 \\ &= 64 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ B &= 0,50 \text{ T} \\ N &= 100 \text{ lilitan} \\ \varepsilon_m &= 20 \text{ volt} \end{aligned}$$

Ditanya: $f = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= N.B.A\omega \\ &= N.B.A.2\pi f \\ f &= \frac{\varepsilon_m}{N.B.A.2\pi} \\ &= \frac{20}{(100)(0,50)(64 \times 10^{-4})(2)(3,14)} \\ &= \frac{20}{20,096 \times 10^{-4}} \\ &= 9,95 \text{ Hz} \end{aligned}$$

2. Sebuah transformator dapat digunakan untuk menghubungkan radio transistor 9 volt AC, dari tegangan sumber 120 volt. Kumparan sekunder transistor terdiri atas 30 lilitan. Jika kuat arus yang diperlukan oleh radio transistor 400 mA, hitunglah:
- jumlah lilitan primer,
 - kuat arus primer,
 - daya yang dihasilkan transformator!

Penyelesaian:

Diketahui: $V_p = 120 \text{ V}$ $N_s = 30$
 $V_s = 9 \text{ V}$ $I_s = 400 \text{ mA} = 0,4 \text{ A}$

Ditanya:

- $N_p = \dots ?$
- $I_p = \dots ?$
- $P = \dots ?$

Jawab:

a. $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$

$$N_p = N_s \cdot \left(\frac{V_p}{V_s} \right) = 30 \left(\frac{120}{9} \right) = 400 \text{ lilitan}$$

b. $\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_s}{N_p}$

$$I_p = I_s \cdot \left(\frac{N_p}{N_s} \right) = 0,4 \left(\frac{400}{30} \right)$$

$$I_p = 5,33 \text{ A}$$

c. $P_s = I_s \cdot V_s = (0,4 \text{ A}) (9 \text{ V}) = 3,6 \text{ W}$

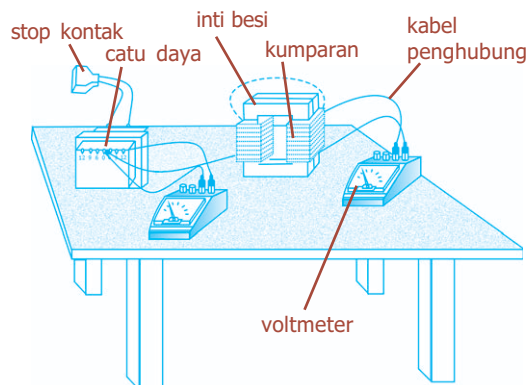
Kegiatan

Tujuan : Mengetahui prinsip kerja transformator.

Alat dan Bahan : Voltmeter AC, amperemeter AC, sumber tegangan AC (transformator), kumparan, kabel, stop kontak

Cara Kerja:

- Susunlah rangkaian percobaan sesuai gambar.
- Hubungkan sumber tegangan (transformator) dengan kumparan primer pada beda potensial terkecil.
- Hidupkan rangkaian dan catatlah tegangan pada rangkaian primer V_p . Catatlah pula besarnya tegangan sekunder V_s .



- Ulangilah langkah percobaan dengan mengukur kuat arus yang mengalir pada kumparan yang digunakan.
- Ulangilah percobaan untuk jumlah lilitan primer lebih sedikit dari jumlah lilitan sekunder.
- Ulangilah percobaan untuk jumlah lilitan primer lebih banyak dari jumlah lilitan sekunder.
- Voltmeter dipasang paralel dan amperemeter dipasang seri.
- Catatlah hasilnya mengikuti format berikut ini.

No.	N_p (Buah)	N_s (Buah)	V_p (volt)	V_s (volt)	I_p (A)	I_s (A)

Diskusi:

- Apakah fungsi transformator?
- Apakah yang dimaksud kumparan primer dan kumparan sekunder?
- Bagaimana hubungan antara jumlah kumparan dengan besarnya beda potensial?
- Bagaimana hubungan antara jumlah kumparan dengan besarnya arus?
- Tulislah rumus hubungan antara jumlah kumparan, beda potensial, dan kuat arus!

Uji Kemampuan 6.4

Sebuah kumparan berbentuk persegi panjang memiliki luas bidang kumparan $12 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. Kumparan tersebut memiliki 160 lilitan yang berputar terhadap suatu poros yang sejajar dengan sisi panjangnya dan menghasilkan 1.500 putaran tiap menitnya dalam suatu medan magnetik homogen 0,06 T. Tentukan ggl induksi sesaat ketika bidang kumparan membuat sudut 60° terhadap arah medan magnetik!



C. Induktansi

Induktansi merupakan sifat sebuah rangkaian listrik atau komponen yang menyebabkan timbulnya ggl di dalam rangkaian sebagai akibat perubahan arus yang melewati rangkaian (*self inductance*) atau akibat perubahan arus yang melewati rangkaian tetangga yang dihubungkan secara magnetis (*induktansi bersama* atau *mutual inductance*). Pada

kedua keadaan tersebut, perubahan arus berarti ada perubahan medan magnetik, yang kemudian menghasilkan ggl.

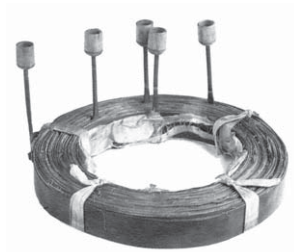
Apabila sebuah kumparan dialiri arus, di dalam kumparan tersebut akan timbul medan magnetik. Selanjutnya, apabila arus yang mengalir besarnya berubah-ubah terhadap waktu akan menghasilkan fluks magnetik yang berubah terhadap waktu. Perubahan fluks magnetik ini dapat menginduksi rangkaian itu sendiri, sehingga di dalamnya timbul ggl induksi. Ggl induksi yang diakibatkan oleh perubahan fluks magnetik sendiri dinamakan ggl induksi diri.

1. Induktansi Diri (Ggl Induksi pada Kumparan)

Apabila arus berubah melewati suatu kumparan atau solenoida, terjadi perubahan fluks magnetik di dalam kumparan yang akan menginduksi ggl pada arah yang berlawanan. Ggl terinduksi ini berlawanan arah dengan perubahan fluks. Jika arus yang melalui kumparan meningkat, kenaikan fluks magnet akan menginduksi ggl dengan arah arus yang berlawanan dan cenderung untuk memperlambat kenaikan arus tersebut. Dapat disimpulkan bahwa ggl induksi ϵ sebanding dengan laju perubahan arus yang dirumuskan:

$$\epsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.24)$$

dengan I merupakan arus sesaat, dan tanda negatif menunjukkan bahwa ggl yang dihasilkan berlawanan dengan perubahan arus. Konstanta kesebandingan L disebut induktansi diri atau induktansi kumparan, yang memiliki satuan henry (H), yang didefinisikan sebagai satuan untuk menyatakan besarnya induktansi suatu rangkaian tertutup yang menghasilkan ggl satu volt bila arus listrik di dalam rangkaian berubah secara seragam dengan laju satu ampere per detik.



Sumber: *Jendela Iptek Listrik*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 6.11 Kumparan yang digunakan Henry untuk mengetahui induktansi diri.

Contoh Soal

Sebuah kumparan mempunyai induktansi diri 2,5 H. Kumparan tersebut dialiri arus searah yang besarnya 50 mA. Berapakah besar ggl induksi diri kumparan apabila dalam selang waktu 0,4 sekon kuat arus menjadi nol?

Penyelesaian:

$$\begin{array}{ll} \text{Diketahui: } L = 2,5 \text{ H} & \Delta t = 0,4 \text{ s} \\ I_1 = 50 \text{ mA} = 5 \times 10^{-2} \text{ A} & I_2 = 0 \end{array}$$

Ditanya: $\varepsilon = \dots ?$

Jawab:

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -2,5 \left[\frac{0 - (5 \times 10^{-2})}{0,4} \right] = (-2,5)(-0,125) = 0,31 \text{ volt}$$

Uji Kemampuan 6.5

Dalam sebuah induktor 120 mH terjadi perubahan arus dari 8 ampere menjadi 4 ampere dalam waktu 0,06 sekon. Berapakah ggl yang akan diinduksi dalam induktor tersebut?

2. Induksi Diri pada Solenoida dan Toroida

Solenoida merupakan kumparan kawat yang terlilit pada suatu pembentuk silinder. Pada kumparan ini panjang pembentuk melebihi garis tengahnya. Bila arus dilewatkan melalui kumparan, suatu medan magnetik akan dihasilkan di dalam kumparan sejajar dengan sumbu. Sementara itu, **toroida** adalah solenoida yang dilengkungkan sehingga sumbunya menjadi berbentuk lingkaran.

Sebuah kumparan yang memiliki induktansi diri L yang signifikan disebut **induktor**. Induktansi diri L sebuah solenoida dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (6.4). Medan magnet di dalam solenoida adalah:

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I$$

dengan $n = \frac{N}{l}$, dari persamaan (6.3) dan (6.24) akan diperoleh:

$$\varepsilon = -N \left(\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \right) = -L \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} \right)$$

Jadi,

$$L = -N \left(\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta I} \right) \dots \dots \dots (6.25)$$

$$\text{karena } \Phi_B = B \cdot A = \frac{\mu_0 N I A}{l}$$

Perubahan I akan menimbulkan perubahan fluks sebesar

$$\Delta \Phi_B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot A \cdot \Delta I}{l} \dots \dots \dots (6.26)$$

Sehingga:

$$L = N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta I}$$

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l} \dots\dots\dots (6.27)$$

dengan:

L = induktansi diri solenoida atau toroida (H)

μ_0 = permeabilitas udara ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am)

N = jumlah lilitan

l = panjang solenoida atau toroida (m)

A = luas penampang (m^2)

3. Energi yang Tersimpan dalam Induktor

Energi yang tersimpan dalam induktor (kumparan) tersimpan dalam bentuk medan magnetik. Energi U yang tersimpan di dalam sebuah induktansi L yang dilewati arus I , adalah:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \dots\dots\dots (6.28)$$

Energi pada induktor tersebut tersimpan dalam medan magnetiknya. Berdasarkan persamaan (6.27), bahwa besar induktansi solenoida setara dengan $\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l}$, dan medan magnet di dalam solenoida berhubungan

dengan kuat arus I dengan $B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l}$. Jadi,

$$I = \frac{B \cdot l}{\mu_0 \cdot N}$$

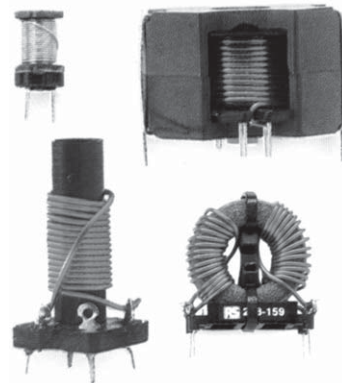
Maka, dari persamaan (6.28) akan diperoleh:

$$U = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l} \right] \left[\frac{B \cdot l}{\mu_0 \cdot N} \right]^2$$

$$U = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Al \dots\dots\dots (6.29)$$

Apabila energi pada persamaan (6.29) tersimpan dalam suatu volume yang dibatasi oleh lilitan Al , maka besar energi per satuan volume atau yang disebut **kerapatan energi**, adalah:

$$u = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \dots\dots\dots (6.30)$$



Sumber: *Jendela Iptek Elektronika*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 6.12 Berbagai macam induktor.

Contoh Soal

Sebuah induktor terbuat dari kumparan kawat dengan 50 lilitan. Panjang kumparan 5 cm dengan luas penampang 1 cm^2 . Hitunglah:

- induktansi induktor,
- energi yang tersimpan dalam induktor bila kuat arus yang mengalir 2 A!

Penyelesaian:

Diketahui: $N = 50$ lilitan
 $l = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $A = 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$

Ditanya: a. $L = \dots ?$
 b. U jika $I = 2 \text{ A} \dots ?$

Jawab:

a. Induktansi induktor (L)

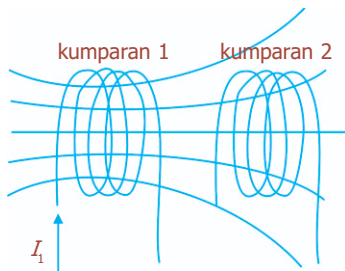
$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(50)^2(10^{-4})}{5 \times 10^{-2}} = \frac{100\pi \times 10^{-9}}{5 \times 10^{-2}} = 62,8 \times 10^{-7} \text{ H} = 6,28 \text{ } \mu\text{H}$$

b. Energi yang tersimpan jika $I = 2 \text{ A}$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} (6,28 \times 10^{-6})(2^2) = 12,56 \times 10^{-6} \text{ J} = 12,56 \text{ } \mu\text{J}$$

Uji Kemampuan 6.6

- Sebuah toroida memiliki 100 lilitan dengan luas penampang $6,0 \text{ cm}^2$. Jika jari-jari efektifnya 50 cm , tentukan:
 - induktansi toroida,
 - energi magnetik yang tersimpan dalam toroida jika dialiri arus $4,0 \text{ A}$
- Kumparan dengan induktansi diri $4,0 \text{ H}$ dan hambatan $10,0 \text{ ohm}$ ditempatkan pada terminal baterai 12 V yang tahan dalamnya dapat diabaikan. Berapakah arus terukur dan energi yang tersimpan dalam induktor?



Gambar 6.13 Perubahan arus di salah satu kumparan akan menginduksi arus pada kumparan yang lain.

4. Induktansi Bersama

Apabila dua kumparan saling berdekatan, seperti pada Gambar 6.13, maka sebuah arus tetap I di dalam sebuah kumparan akan menghasilkan sebuah fluks magnetik Φ yang mengitari kumparan lainnya, dan menginduksi ggl pada kumparan tersebut. Menurut Hukum Faraday, besar ggl \mathcal{E}_2 yang diinduksi ke kumparan tersebut berbanding lurus dengan laju perubahan fluks yang melewatinya. Karena fluks berbanding lurus dengan kumparan 1, maka \mathcal{E}_2 harus sebanding dengan laju perubahan arus pada kumparan 1, dapat dinyatakan:

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.31)$$

Dengan M adalah konstanta pembanding yang disebut **induktansi bersama**. Nilai M tergantung pada ukuran kumparan, jumlah lilitan, dan jarak pisahnya.

Induktansi bersama mempunyai satuan henry (H), untuk mengenang fisikawan asal AS, Joseph Henry (1797 - 1878).

Pada situasi yang berbeda, jika perubahan arus kumparan 2 menginduksi ggl pada kumparan 1, maka konstanta pembandingan akan bernilai sama, yaitu:

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t} \dots\dots\dots (6.32)$$

Induktansi bersama diterapkan dalam transformator, dengan memaksimalkan hubungan antara kumparan primer dan sekunder sehingga hampir seluruh garis fluks melewati kedua kumparan tersebut. Contoh lainnya diterapkan pada beberapa jenis pemacu jantung, untuk menjaga kestabilan aliran darah pada jantung pasien.

Percikan Fisika



Telepon

Ketika pengguna telepon berbicara, getaran suara akan mengubah kepadatan karbon di belakang membran. Arus listrik yang terus-menerus berubah-ubah berjalan sepanjang bentangan kawat telepon menuju penguat suara pada pesawat telepon lawan bicara. Penguat suara mengubah sinyal listrik menjadi suara, di dalamnya terdapat magnet permanen dan elektromagnet. Elektromagnet juga berubah-ubah seirama dengan perubahan arus

listrik. Interaksi antara magnet permanen dan medan magnet elektromagnet menghasilkan getaran membran pada penguat suara. Getaran membran ini kemudian akan menghasilkan suara yang sama dengan suara pengirim.

Fiesta

Fisikawan Kita



Joseph Henry (1797 - 1878)

Joseph Henry lahir di Albany 9 Desember 1797 dan meninggal di Washington tanggal 13 Mei 1878. Ia adalah seorang ahli fisika dari Amerika. Pada tahun 1826 menjadi guru besar dalam ilmu pasti di Albany, New York. Namanya mulai terkenal berkat penyelidikannya dalam bidang elektromagnet. Meskipun secara terpisah, tetapi dalam waktu yang bersamaan dengan ahli fisika dan kimia Inggris Michael Faraday, Henry menemukan induksi. Namanya kemudian diabadikan menjadi satuan induksi diri. Karya tulisnya adalah *Contributions to Electricity and Magnetism*.

- ✱ Induksi elektromagnetik adalah gejala timbulnya gaya gerak listrik di dalam suatu konduktor bila terdapat percobaan fluks magnetik pada konduktor tersebut.
- ✱ Fluks magnetik (Φ) adalah banyaknya garis medan magnetik (B) yang menembus permukaan bidang seluas (A) dalam arah tegak lurus.

$$\Phi = B.A \cos \theta$$

- ✱ Hukum Faraday: “Ggl induksi yang timbul antara ujung-ujung suatu loop penghantar berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar tersebut”.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}; \quad \varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- ✱ Hukum Lenz menyatakan bahwa ggl induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetnya berlawanan dengan asal perubahan fluks.

- ✱ Ggl induksi akibat perubahan luas bidang kumparan,

$$\varepsilon = B.l.v$$

- ✱ Ggl induksi akibat perubahan orientasi sudut kumparan θ terhadap medan,

$$\varepsilon = -N.B.A \left(\frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_1}{t_2 - t_1} \right)$$

- ✱ Ggl induksi akibat perubahan induksi magnetik

$$\varepsilon = -N.A \cos \theta \left(\frac{B_2 - B_1}{t_2 - t_1} \right)$$

- ✱ Ggl induksi pada generator

$$\varepsilon = N.B.A \omega \sin \omega t$$

$$\varepsilon_{\text{maks}} = N.B.A \omega$$

- ✱ Transformator adalah alat untuk mengubah tegangan arus bolak-balik

$$\text{Pada trafo berlaku: } \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

$$\text{Efisiensi transformator: } \eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% = \frac{V_s \cdot I_s}{V_p \cdot I_p} \times 100\%$$

- ✱ Ggl induksi diri pada kumparan:

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

- ✱ Induktansi diri solenoida dan toroida

$$L = -N \left(\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta I} \right)$$

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

- ※ Energi yang tersimpan dalam induktor

$$W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Al$$

- ※ Induktansi bersama

$$\varepsilon_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad \text{atau} \quad \varepsilon_1 = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

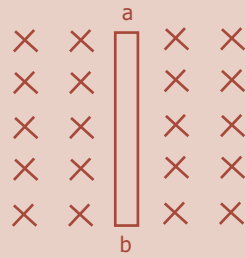
Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

- Sebuah bidang seluas 40 cm^2 berada dalam daerah medan magnetik homogen dengan induksi magnetik $8 \times 10^{-4} \text{ T}$. Jika sudut antara arah normal bidang dengan medan magnetik adalah 60° , maka besar fluks magnetiknya adalah
 - $32 \times 10^{-7} \text{ Wb}$
 - $16 \times 10^{-7} \text{ Wb}$
 - $6,4 \times 10^{-7} \text{ Wb}$
 - $3,2 \times 10^{-7} \text{ Wb}$
 - $1,6 \times 10^{-7} \text{ Wb}$
- Sebuah penghantar yang digerakkan dalam medan magnetik akan menghasilkan beda potensial pada ujung-ujung penghantar yang dinamakan
 - tegangan jepit
 - gaya gerak listrik induksi
 - induksi elektromagnetik
 - fluks magnetik
 - kuat medan magnetik
- Menaikkan ggl maksimum suatu generator AC agar menjadi 4 kali semula, dapat dilakukan dengan cara
 - jumlah lilitan dilipatgandakan dan periode putar menjadi $1/2$ kali semula
 - kecepatan sudut dan luas penampang kumparan dijadikan $1/2$ kalinya
 - induksi magnet dan jumlah lilitan dijadikan 4 kali semula
 - luas penampang dan periode putar dijadikan 2 kali semula
 - luas penampang dan periode putar dijadikan $1/2$ kali semula

4. Suatu kumparan dengan induktansi 0,25 H dialiri arus yang berubah terhadap waktu menurut persamaan $T = 8 - 6t^2$ (dalam satuan SI). Ggl induksi diri sebesar 12 volt timbul pada saat t sama dengan
- 1 detik
 - 2 detik
 - 3 detik
 - 4 detik
 - 5 detik
5. Kumparan primer suatu transformator mempunyai 200 lilitan dan kumparan sekundernya 50 lilitan. Jika kuat arus dalam kumparan sekundernya 10 A, kuat arus dalam kumparan primer adalah
- 2,5 A
 - 4 A
 - 20 A
 - 25 A
 - 40 A
6. Apabila suatu kumparan memiliki induktansi 0,2 H dan dialiri arus sebesar 5 A, maka energi yang tersimpan dalam kumparan adalah
- 0,1 J
 - 0,5 J
 - 1 J
 - 2,5 J
 - 25 J
7. Bila sebuah generator berputar 1.500 putaran/menit untuk membangkitkan arus 100 V, maka besarnya kecepatan sudut untuk membangkitkan 120 V sebesar
- 1.200 putaran/menit
 - 1.500 putaran/menit
 - 1.800 putaran/menit
 - 2.100 putaran/menit
 - 2.400 putaran/menit
8. Sebuah trafo step-down dipakai untuk menurunkan tegangan 2.200 V menjadi 110 V. Jika pada kumparan sekunder terdapat 25 lilitan, banyaknya lilitan pada kumparan primer adalah
- 200 lilitan
 - 250 lilitan
 - 500 lilitan
 - 700 lilitan
 - 1.000 lilitan

9.



- a. 4 m/s ke kanan
- b. 4 m/s ke kiri
- c. 2 m/s ke kiri

Kawat a - b dengan panjang 1,5 m ditaruh dalam medan magnet 0,5 T dengan arah masuk bidang kertas (lihat gambar). Ternyata di ujung-ujung kawat timbul beda potensial 3 volt dengan potensial a lebih tinggi daripada b. Besar dan arah kecepatan gerak kawat a - b adalah

- d. 2 m/s ke kanan
- e. 1 m/s ke kanan

10. Sebuah solenoida dengan panjang 6,28 cm dan luas penampang 5 cm^2 terdiri atas 300 lilitan. Jika arus yang mengalir dalam solenoida adalah 2 A, maka energi yang tersimpan dalam solenoida adalah

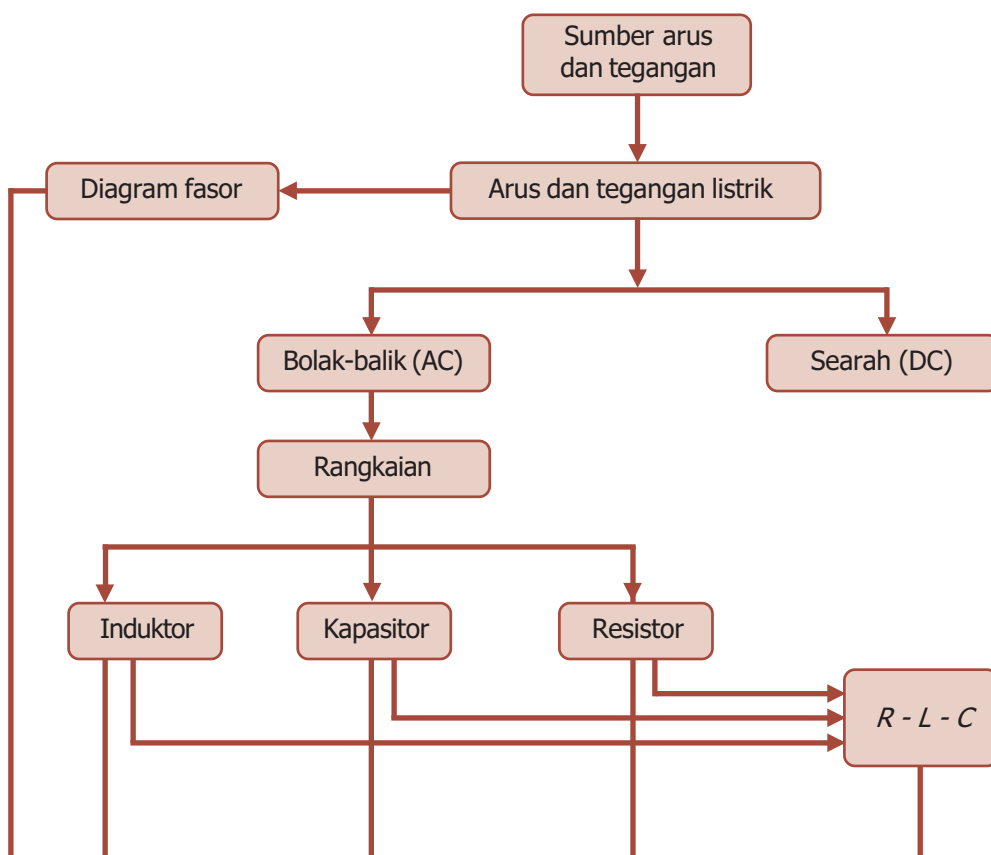
- a. $1,8 \times 10^{-3} \text{ J}$
- b. $9 \times 10^{-4} \text{ J}$
- c. $4,5 \times 10^{-4} \text{ J}$
- d. $3 \times 10^{-4} \text{ J}$
- e. $1,5 \times 10^{-4} \text{ J}$

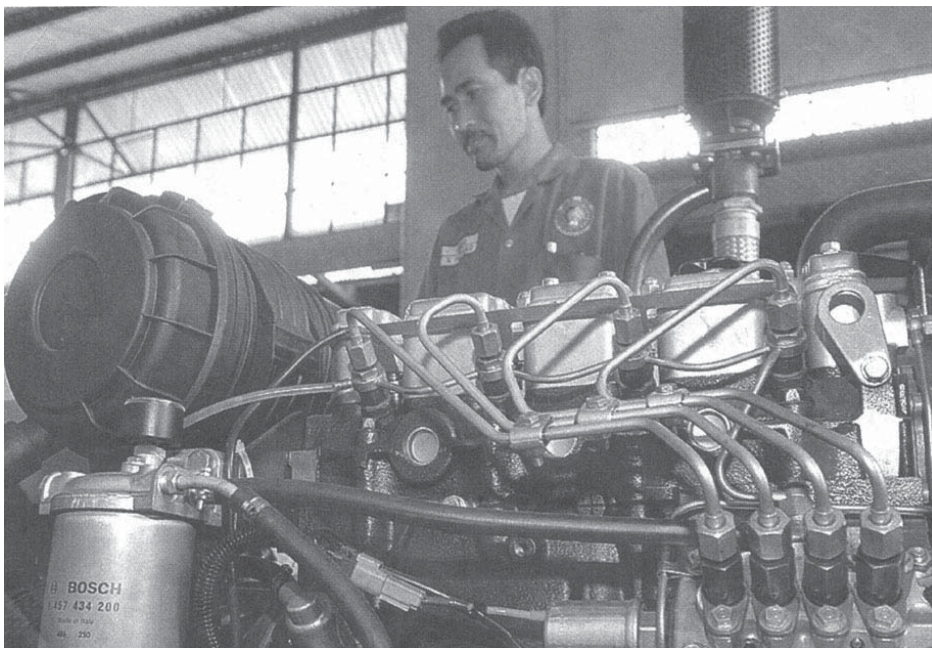
B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Sebuah trafo step-up mengubah tegangan 25 volt menjadi 250 volt. Jika efisiensi transformator 80% dan kumparan sekundernya dihubungkan dengan lampu 250 V/50 W, tentukan kuat arus primernya!
2. Sebuah generator armaturnya berbentuk bujur sangkar dengan sisi 8 cm dan terdiri atas 100 lilitan. Jika armaturnya itu berada dalam medan magnet 0,5 T, berapakah frekuensi putarnya supaya menimbulkan tegangan maksimum 20 V?
3. Sebuah kumparan mempunyai induktansi diri 0,8 H. Jika dalam setengah sekon kuat arusnya berubah dari 40 mA menjadi 10 mA, tentukan ggl induksi diri kumparan tersebut!
4. Sebuah solenoida terdiri atas 3.000 lilitan. Panjang solenoida 0,2 m dan luas penampangnya $\frac{5}{\pi} \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$). Tentukan besar induktansi diri dari solenoida tersebut!
5. Sebuah toroida terdiri atas 500 lilitan per satuan panjang dan luas penampangnya 4 cm^2 . Tentukan:
 - a. induktansi toroida,
 - b. energi yang tersimpan dalam toroida jika arus yang mengalir 2 A!

PETA KONSEP

Bab 7 Arus dan Tegangan Listrik Bolak-Balik





● Generator menghasilkan energi listrik.

Sumber: *Dokumen Penerbit*, 2006

Sebagian besar energi listrik yang digunakan sekarang dihasilkan oleh generator listrik dalam bentuk arus bolak-balik. Arus bolak-balik tersebut dapat dihasilkan dengan induksi magnetik dalam sebuah generator AC. Kalian tentu mengetahui bahwa sebuah generator dirancang sedemikian rupa untuk membangkitkan ggl sinusoida. Apakah ggl sinusoida itu? Bagaimana hubungannya dengan arus dalam induktor, kapasitor, atau resistornya? Untuk lebih mengetahuinya ikutilah pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

arus searah, arus bolak-balik, diagram fasor, rangkaian *RLC*, resistor

Dalam kehidupan sehari-hari kita jumpai alat-alat seperti dinamo sepeda dan generator. Kedua alat tersebut merupakan sumber arus dan tegangan listrik bolak-balik. Arus bolak-balik atau *alternating current* (AC) adalah arus dan tegangan listrik yang besarnya berubah terhadap waktu dan dapat mengalir dalam dua arah. Arus bolak-balik (AC) digunakan secara luas untuk penerangan maupun peralatan elektronik. Dalam bab ini kita akan membahas mengenai hambatan, induktor, dan kapasitor dalam rangkaian arus bolak-balik.



A. Rangkaian Arus Bolak-Balik



Sumber: *Intisari*, 2005

Gambar 7.1 Setrika merupakan alat yang menggunakan arus bolak-balik.

Sumber arus bolak-balik adalah generator arus bolak-balik yang prinsip kerjanya pada perputaran kumparan dengan kecepatan sudut ω yang berada di dalam medan magnetik. Sumber ggl bolak-balik tersebut akan menghasilkan tegangan sinusoida berfrekuensi f . Dalam suatu rangkaian listrik, simbol untuk sebuah sumber tegangan gerak elektrik bolak-balik adalah $\text{---} \sim \text{---}$.

Tegangan sinusoida dapat dituliskan dalam bentuk persamaan tegangan sebagai fungsi waktu, yaitu:

$$V = V_m \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t \dots\dots\dots (7.1)$$

Tegangan yang dihasilkan oleh suatu generator listrik berbentuk sinusoida. Dengan demikian, arus yang dihasilkan juga sinusoida yang mengikuti persamaan:

$$I = I_m \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t \dots\dots\dots (7.2)$$

dengan I_m adalah arus puncak dan t adalah waktu.

Untuk menyatakan perubahan yang dialami arus dan tegangan secara sinusoida, dapat dilakukan dengan menggunakan sebuah diagram vektor yang berotasi, yang disebut **diagram fasor**. Istilah *fasor* menyatakan vektor berputar yang mewakili besaran yang berubah-ubah secara sinusoida. Panjang vektor menunjukkan amplitudo besaran, dan vektor ini dibayangkan berputar dengan kecepatan sudut yang besarnya sama dengan frekuensi sudut besaran. Sehingga, nilai sesaat besaran ditunjukkan oleh proyeksinya pada sumbu tetap. Cara ini baik sekali untuk menunjukkan sudut fase antara dua besaran. Sudut fase ini ditampilkan pada sebuah diagram sebagai sudut antara fasor-fasornya.

BETA[®] Berita Fisika

Generator pada pusat pembangkit listrik modern tidak menghasilkan listrik pada tegangan tinggi yang mencukupi untuk transmisi yang efisien. Tegangan dinaikkan dengan transformator step-up supaya transmisi jarak jauh menjadi efisien.

Gambar 7.2 memperlihatkan diagram fasor untuk arus sinusoida dan tegangan sinusoida yang berfase sama yang dirumuskan pada persamaan (7.1) dan (7.2). Ketika di kelas X kita telah mempelajari dan mengetahui bahwa:

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (7.3)$$

yang menyatakan akar kuadrat rata-rata tegangan. Dan akar kuadrat rata-rata arus, yang dirumuskan:

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (7.4)$$

Nilai *rms* dari arus dan tegangan tersebut kadang-kadang disebut sebagai “nilai efektif”.

1. Rangkaian Resistor

Gambar 7.3(a) memperlihatkan sebuah rangkaian yang hanya memiliki sebuah elemen penghambat dan generator arus bolak-balik. Karena kuat arusnya nol pada saat tegangannya nol, dan arus mencapai puncak ketika tegangan juga mencapainya, dapat dikatakan bahwa arus dan tegangan sefase (Gambar 7.3(b)). Sementara itu, Gambar 7.3(c) memperlihatkan diagram fasor arus dan tegangan yang sefase. Tanda panah pada sumbu vertikal adalah nilai-nilai sesaat. Pada rangkaian resistor berlaku hubungan:

$$\begin{aligned} V_R &= V_m \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t \\ V_R &= V_m \cdot \sin \omega t \quad (7.5) \end{aligned}$$

Jadi,

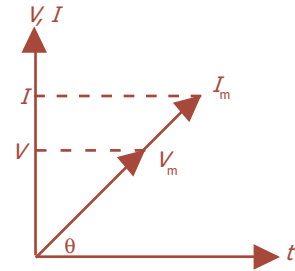
$$\begin{aligned} I_R &= \frac{V_R}{R} \\ &= \frac{V_m}{R} \sin \omega t \end{aligned}$$

$$I_R = I_m \cdot \sin \omega t \quad (7.6)$$

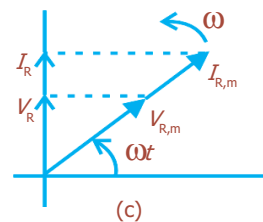
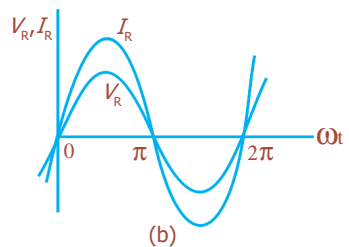
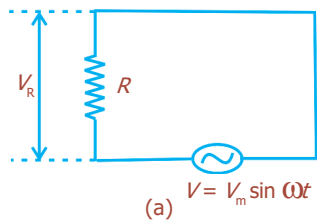
Sehingga, pada rangkaian resistor juga akan berlaku hubungan sebagai berikut:

$$I_m = \frac{V_m}{R} \Leftrightarrow V_m = I_m \cdot R \quad (7.7)$$

$$I_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{R} \Leftrightarrow V_{\text{ef}} = I_{\text{ef}} \cdot R \quad (7.8)$$



Gambar 7.2 Diagram fasor arus dan tegangan berfase sama.

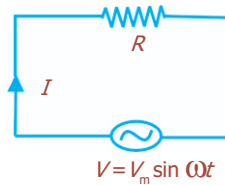


Gambar 7.3 (a) Rangkaian dengan sebuah elemen penghambat. (b) Arus berfase sama dengan tegangan. (c) Diagram fasor arus dan tegangan.

Contoh Soal

Dalam rangkaian AC seperti yang diperlihatkan pada gambar, $R = 40 \Omega$, $V_m = 100 \text{ V}$, dan frekuensi generator $f = 50 \text{ Hz}$. Dianggap tegangan pada ujung-ujung resistor $V_R = 0$ ketika $t = 0$. Tentukan:

- arus maksimum,
- frekuensi sudut generator,
- arus melalui resistor pada $t = \frac{1}{75} \text{ s}$,
- arus melalui resistor pada $t = \frac{1}{150} \text{ s}$!



Penyelesaian:

- Rangkaian resistor murni, I_m dapat dicari dengan persamaan:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{100}{40} = 2,5 \text{ A}$$

- Frekuensi sudut angular (ω)

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 100 \pi$$

- Untuk rangkaian resistor murni, tegangan sefase dengan arus, sehingga untuk $V = V_m \cdot \sin \omega t$, maka $I = I_m \cdot \sin \omega t$. Persamaan arus sesaat yaitu:

$$I_{(t)} = I_m \cdot \sin \omega t = 2,5 \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} I &= (2,5) \sin 100 \pi \left(\frac{1}{75} \right) = (2,5) \sin \frac{4}{3} \pi \\ &= 2,5 \left(-\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) \end{aligned} \quad \begin{aligned} \sin \frac{4}{3} \pi &= \sin \left(\pi + \frac{1}{3} \pi \right) \text{ kuadran III} \\ &= -\sin \frac{1}{3} \pi \\ &= -\sin 60^\circ = -\frac{1}{2} \sqrt{3} \end{aligned}$$

$$I = \left(-\frac{5}{4} \sqrt{3} \right) \text{ A}$$

- $I_{\left(\frac{1}{150} \text{ s} \right)} = (2,5) \sin 100 \pi \left(\frac{1}{150} \right)$

$$= 2,5 \left(\sin \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$= 2,5 \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right)$$

$$I = \frac{5}{4} \sqrt{3} \text{ A}$$

$$\sin \frac{2}{3} \pi = \sin \left(\pi - \frac{1}{3} \pi \right) \text{ kuadran III}$$

$$\sin \frac{1}{3} \pi = \sin 60^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3}$$

Uji Kemampuan 7.1

Tahanan 10Ω dihubungkan pada ggl sinusoida yang memiliki nilai puncak 48 volt. Tentukan:

- arus rms,
- daya rata-rata,
- daya maksimum!

2. Rangkaian Induktif

Gambar 7.4 memperlihatkan sebuah rangkaian yang hanya mengandung sebuah elemen induktif. Pada rangkaian induktif, berlaku hubungan:

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \dots\dots\dots (7.9)$$

$$V = V_m \sin \omega t \dots\dots\dots (7.10)$$

Tegangan pada induktor V_L setara dengan tegangan sumber V , jadi dari persamaan (7.9) dan (7.10) akan diperoleh:

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_m \sin \omega t$$

$$dI_L = \int \frac{V_m}{L} \sin \omega t dt$$

$$dI_L = -\frac{V_m}{\omega L} \cos \omega t \dots\dots\dots (7.11)$$

diketahui bahwa $\cos \omega t = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) = -\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$, maka

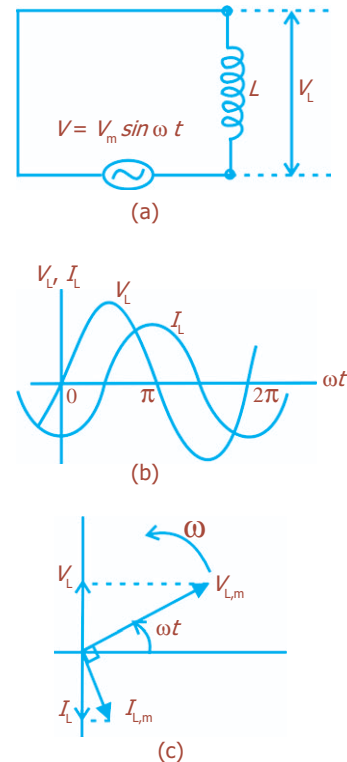
$$I_L = \frac{V_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots (7.12)$$

Jika $\omega L = 2\pi fL$ didefinisikan sebagai *reaktansi induktif* (X_L), maka dalam suatu rangkaian induktif berlaku hubungan sebagai berikut:

$$I_m = \frac{V_m}{X_L} \Leftrightarrow X_L = \frac{V_m}{I_m} \dots\dots\dots (7.13)$$

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{X_L} \Leftrightarrow X_L = \frac{V_{ef}}{I_{ef}} \dots\dots\dots (7.14)$$

Perbandingan persamaan (7.10) dan (7.12) memperlihatkan bahwa nilai V_L dan I_L yang berubah-ubah terhadap waktu mempunyai perbedaan fase sebesar seperempat siklus. Hal ini terlihat pada Gambar 7.4(b), yang merupakan grafik dari persamaan (7.10) dan (7.12). Dari gambar terlihat bahwa V_L mendahului I_L , yaitu dengan berlalunya waktu, maka V_L mencapai maksimumnya sebelum I_L mencapai maksimum, selama seperempat siklus. Sementara itu, pada Gambar 7.4(c), pada waktu fasor berotasi di dalam arah yang berlawanan dengan arah perputaran jarum jam, maka terlihat jelas bahwa fasor $V_{L,m}$ mendahului fasor $I_{L,m}$ selama seperempat siklus.



Gambar 7.4
(a) Rangkaian induktif (b) Arus berbeda fase dengan tegangan (c) Diagram fasor arus dan tegangan yang berbeda fase.

Contoh Soal

Sebuah induktor 0,2 henry dipasang pada sumber tegangan arus bolak-balik, $V = (200 \sin 200t)$ volt. Tentukan persamaan arus yang mengalir pada rangkaian tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $V = (200 \sin 200t)$ volt

$L = 0,2$ H

Ditanya: $I = \dots ?$

Jawab:

$$V = V_m \sin \omega t$$

$$V = 200 \sin 200t$$

Dari persamaan diketahui $V_m = 200$ volt dan $\omega = 200$ rad/s, maka:

$$X_L = \omega \cdot L = (200)(0,2)$$

$$X_L = 40 \Omega$$

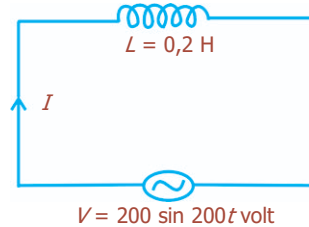
$$I_m = \frac{V_m}{X_L} = \frac{200}{40}$$

$$I_m = 5 \text{ A}$$

Dalam rangkaian ini arus tertinggal $\frac{\pi}{2}$ rad terhadap tegangan, sehingga:

$$I = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I = 5 \sin \left(200t - \frac{\pi}{2} \right) \text{ ampere}$$



Uji Kemampuan 7.2

Sebuah induktor 60 mH ditempatkan pada pembangkit AC yang memiliki ggl maksimum 120 volt. Hitunglah reaktansi induktif dan arus maksimum apabila frekuensinya 40 Hz!



Sumber: *Fisika Jilid 2*, Erlangga, 2001

Gambar 7.5 Berbagai macam kapasitor.

3. Rangkaian Kapasitor

Gambar 7.6 memperlihatkan sebuah rangkaian yang hanya terdiri atas sebuah elemen kapasitif dan generator AC. Pada rangkaian tersebut berlaku hubungan:

$$V_c = V = V_m \sin \omega t \dots\dots\dots (7.15)$$

Dari definisi C diperoleh hubungan bahwa $V_c = Q/C$, maka akan diperoleh:

$$Q = C \cdot V_m \sin \omega t$$

atau

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \omega \cdot C \cdot V_m \cdot \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (7.16)$$

Diketahui bahwa $\cos \omega t = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, maka akan diperoleh:

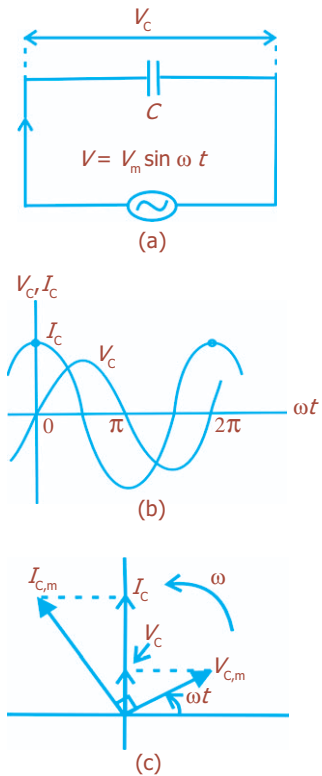
$$I_C = \omega \cdot C \cdot V_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (7.17)$$

Jika didefinisikan sebuah *reaktansi kapasitif* (X_C), adalah setara dengan $\frac{1}{\omega C}$ atau $\frac{1}{2\pi f C}$, maka dalam sebuah rangkaian kapasitif akan berlaku hubungan sebagai berikut:

$$I_m = \frac{V_m}{X_C} \Leftrightarrow X_C = \frac{V_m}{I_m} \quad \dots\dots\dots (7.18)$$

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{X_C} \Leftrightarrow X_C = \frac{V_{ef}}{I_{ef}} \quad \dots\dots\dots (7.19)$$

Persamaan (7.15) dan (7.16) menunjukkan bahwa nilai V_C dan I_C yang berubah-ubah terhadap waktu adalah berbeda fase sebesar seperempat siklus. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 7.6(b), yaitu V_C mencapai maksimumnya setelah I_C mencapai maksimum, selama seperempat siklus. Hal serupa juga diperlihatkan pada Gambar 7.6(c), yaitu sewaktu fasor berotasi di dalam arah yang dianggap berlawanan dengan arah perputaran jarum jam, maka terlihat jelas bahwa fasor $V_{C,m}$ tertinggal terhadap fasor $I_{C,m}$ selama seperempat siklus.



Gambar 7.6 (a) Rangkaian kapasitif. (b) Perbedaan potensial melalui kapasitor terhadap arus. (c) Diagram fasor rangkaian kapasitif.

Contoh Soal

Sebuah kapasitor $50 \mu\text{F}$ dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik. Arus yang mengalir pada rangkaian adalah $I = (4 \cdot \sin 100t) \text{ A}$. Tentukan persamaan tegangan pada kapasitor itu!

Penyelesaian:

Diketahui: $C = 50 \mu\text{F} = 5 \times 10^{-5} \text{ F}$

$I = (4 \cdot \sin 100t) \text{ A}$

Ditanya: Persamaan tegangan, $V = \dots?$

Jawab:

$$I = (I_m \cdot \sin \omega t) \text{ A}$$

$$I = (4 \cdot \sin 100t) \text{ A}$$

maka, $I_m = 4 \text{ A}$, dan $\omega = 100 \text{ rad/s}$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(100)(5 \times 10^{-5})} = \frac{1}{5 \times 10^{-3}}$$

$$= \frac{10^3}{5} = 200 \, \Omega$$

Dari persamaan di atas diperoleh:

$$I_m = \frac{V_m}{X_C}, \text{ maka:}$$

$$V_m = I_m \cdot X_C$$

$$= (4 \, \text{A})(200 \, \Omega)$$

$$= 800 \, \text{volt}$$

$$V = V_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= 800 \cdot \sin\left(100t - \frac{\pi}{2}\right)$$

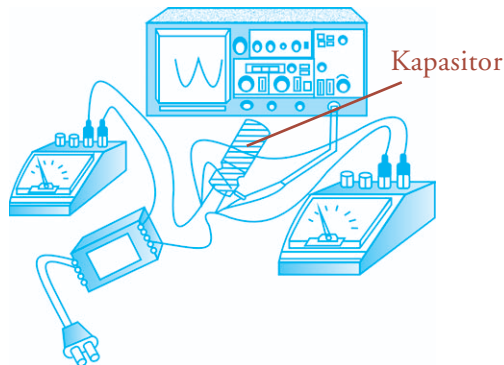
Kegiatan

Tujuan : Mengetahui rangkaian kapasitor dan listrik bolak-balik.

Alat dan bahan : Trafo adaptor, kabel penghubung, kapasitor, amperemeter, voltmeter, dan CRO.

Cara Kerja:

1. Rangkailah alat dan bahan secara seri sesuai gambar.
2. Bacalah nilai beda potensial pada kapasitor dengan voltmeter yang tersedia.
3. Gambarkan bentuk V_c yang ditampilkan oleh CRO.
4. Bacalah nilai beda potensial pada kapasitor dengan CRO yang tersedia.
5. Carilah harga efektif berdasarkan pembacaan CRO.
6. Ulangilah langkah 2 - 4 untuk berbagai jenis kapasitor berdasarkan kapasitansnya.
7. Carilah harga impedansi induktor bilamana $f = 60 \, \text{Hz}$ berdasarkan harga kapasitansi yang tercantum pada kapasitor.
8. Catatlah hasil percobaan dengan mengikuti format tabel berikut ini.



No.	C	V_c	Tampilan CRO	V_{cCRO}	I_R	V_c/I_c	C	$\frac{1}{2}\pi f C$

Diskusi:

1. Gambarkanlah bentuk grafik yang ditampilkan oleh rangkaian kapasitor sederhana sesuai dengan percobaan!
2. Berapakah V_c efektifnya?
3. Apakah nilai $X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{V_c}{I_R}$?
4. Tulislah kesimpulan dari percobaan yang telah kalian lakukan!

Uji Kemampuan 7.3

Sebuah kapasitor $8 \mu\text{F}$ dan sebuah resistor 100 ohm disusun seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan AC. Jika V_m adalah 160 volt dan frekuensi $\frac{120}{\pi} \text{ Hz}$, tentukan:

- a. impedansi rangkaian,
- b. kuat arus maksimum,
- c. sudut fase antara tegangan dan arus!

4. Rangkaian Seri RLC

Pada bagian sebelumnya telah dibahas mengenai rangkaian-rangkaian R , C , dan L yang dihubungkan terpisah. Maka pada bagian ini kita akan membahas sebuah rangkaian seri yang di dalamnya terdapat ketiga elemen tersebut, yang sering disebut rangkaian seri RLC , seperti ditunjukkan pada Gambar 7.7.

Berdasarkan persamaan (7.1), tegangan gerak elektrik untuk Gambar 7.7 diberikan oleh persamaan:

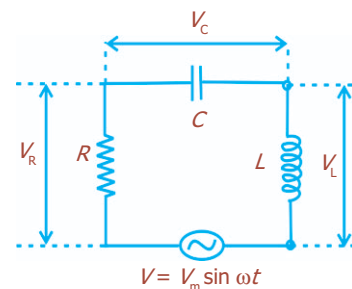
$$V = V_m \sin \omega t \quad (7.20)$$

Arus (tunggal) di dalam rangkaian tersebut adalah:

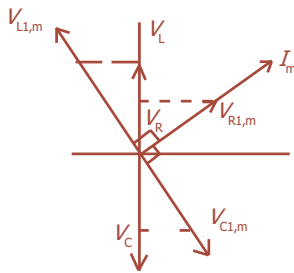
$$I = I_m \sin (\omega t - \phi) \quad (7.21)$$

Dengan ω adalah frekuensi sudut tegangan gerak elektrik bolak-balik pada persamaan (7.20). I_m adalah amplitudo arus dan ϕ menyatakan sudut fase di antara arus bolak-balik pada persamaan (7.21) dan tegangan gerak elektrik pada persamaan (7.20). Pada Gambar 7.7 tersebut akan berlaku persamaan:

$$V = V_R + V_C + V_L \quad (7.22)$$



Gambar 7.7 Sebuah rangkaian seri RLC .



Gambar 7.8 Diagram fasor yang bersesuaian dengan Gambar 7.7.

Setiap parameter merupakan kuantitas-kuantitas yang berubah-ubah terhadap waktu secara sinusoidal. Diagram fasor yang diperlihatkan pada Gambar 7.8 menunjukkan nilai-nilai maksimum dari I , V_R , V_C , dan V_L . Proyeksi-proyeksi fasor pada sumbu vertikal adalah sama dengan V , seperti yang dinyatakan pada persamaan (7.22).

Sebaliknya, dinyatakan bahwa jumlah vektor dari amplitudo-amplitudo fasor $V_{R,m}$, $V_{C,m}$, dan $V_{L,m}$ menghasilkan sebuah fasor yang amplitudonya adalah V pada persamaan (7.20). Proyeksi V_m pada sumbu vertikal, merupakan V dari persamaan (7.20) yang berubah terhadap waktu. Kita dapat menentukan V_m pada Gambar 7.9, yang di dalamnya telah terbentuk fasor $V_{L,m} - V_{C,m}$. Fasor tersebut tegak lurus pada $V_{R,m}$, sehingga akan diperoleh:

$$\begin{aligned} V_m &= \sqrt{V_{R,m}^2 + (V_{L,m} - V_{C,m})^2} \\ &= \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2} \\ V_m &= I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \dots\dots\dots (7.23) \end{aligned}$$

Kuantitas yang mengalikan I_m disebut **impedansi (Z)** rangkaian pada Gambar 7.7. Jadi, dapat dituliskan:

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \dots\dots\dots (7.24)$$

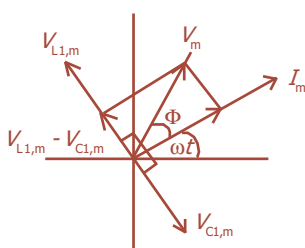
Diketahui bahwa $X_L = \omega L$ dan $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Maka dari persamaan (7.23) dan (7.24) akan diperoleh:

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \dots\dots\dots (7.25)$$

Untuk menentukan sudut fase ϕ di antara I dan V , dapat dilakukan dengan membandingkan persamaan (7.20) dan (7.21). Dari Gambar 7.7 dapat kita tentukan bahwa sudut ϕ dinyatakan:

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{V_{L,m} - V_{C,m}}{V_{R,m}} = \frac{I_m (X_L - X_C)}{I_m R} \\ \tan \phi &= \frac{X_L - X_C}{R} \dots\dots\dots (7.26) \end{aligned}$$

Pada Gambar 7.9 menunjukkan nilai $X_L > X_C$, yaitu bahwa rangkaian seri dari Gambar 7.7 lebih bersifat induktif daripada bersifat kapasitif. Pada keadaan ini V_m mendahului I_m (walaupun tidak sebanyak seperempat siklus seperti pada rangkaian induktif murni dari Gambar 7.3. Sudut fase ϕ pada persamaan (7.26) adalah positif.



Gambar 7.9 Diagram fasor memperlihatkan hubungan antara V dan I pada persamaan (7.20) dan (7.21).

Tetapi, jika $X_C > X_L$, maka rangkaian tersebut akan lebih bersifat kapasitif daripada bersifat induktif, dan V_m akan tertinggal terhadap I_m (walaupun tidak sebanyak seperempat siklus seperti pada rangkaian kapasitif murni). Berdasarkan perubahan ini, maka sudut ϕ pada persamaan (7.26) akan menjadi negatif.

Contoh Soal

1. Rangkaian seri RLC , dengan masing-masing $R = 30 \Omega$, $L = 0,6 \text{ H}$, dan $C = 500 \mu\text{F}$ dipasang pada sumber tegangan bolak-balik dengan $V = (200 \sin 100t) \text{ volt}$. Tentukan:

- impedansi rangkaian,
- persamaan arus pada rangkaian!

Penyelesaian:

Diketahui: Rangkaian seri RLC

$$R = 30 \Omega, L = 0,6 \text{ H}, C = 500 \mu\text{F} = 5 \times 10^{-4} \text{ F}$$

$$V = (200 \sin 100t) \text{ volt}$$

- Ditanyakan: a. $Z = \dots ?$
b. Persamaan $I = \dots ?$

Jawab:

$$\text{a. } V = V_m \sin \omega t$$

$$V_m = 200$$

$$V = (200 \sin 100t) \text{ volt}$$

$$\omega = 100 \text{ rad/s}$$

$$X_L = \omega L = (100)(0,6) = 60 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$= \frac{1}{(100)(5 \times 10^{-4})}$$

$$= \frac{1}{5 \times 10^{-2}}$$

$$= \frac{100}{5} = 20 \Omega$$

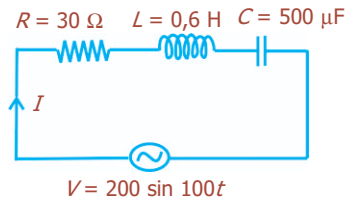
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$= \sqrt{30^2 + (60 - 20)^2}$$

$$= 50 \Omega$$

$$\text{b. } I_m = \frac{V_m}{Z} = \frac{200}{50} = 4 \text{ A}$$

$X_L > X_C$, rangkaian bersifat induktif atau tegangan mendahului arus dengan beda fase 0.



$$\begin{aligned}\tan \phi &= \frac{X_L - X_C}{R} \\ &= \frac{60 - 20}{30} = \frac{40}{30} = \frac{4}{3}\end{aligned}$$

$$\phi = 53^\circ = \frac{53^\circ}{180} \pi \text{ rad}$$

$$I = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

$$I = 4 \sin\left(100t - \frac{53}{180} \pi\right)$$

2. Hambatan R , induktor L , dan kapasitor C , masing-masing mempunyai nilai 300Ω ; $0,9 \text{ H}$; dan $2 \mu\text{F}$. Ketiga komponen listrik tersebut dihubungkan seri dan diberi tegangan efektif AC sebesar 50 volt dengan kecepatan sudut 1.000 rad/s . Tentukan:

- impedansi rangkaian,
- arus efektif rangkaian,
- tegangan pada L ,
- tegangan pada C

Penyelesaian:

Diketahui: $R = 300 \Omega$
 $L = 0,9 \text{ H}$
 $C = 2 \mu\text{F} = 2 \times 10^{-6} \text{ F}$
 $V_{\text{ef}} = 50 \text{ V}$
 $\omega = 1.000 \text{ rad/s}$

Ditanya: a. $Z = \dots ?$ c. $V_L = \dots ?$
b. $I_{\text{ef}} = \dots ?$ d. $V_C = \dots ?$

Jawab:

a. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

reaktansi induktif: $X_L = \omega L = 1.000 \text{ rad/s} \times 0,9 \text{ H} = 900 \Omega$

reaktansi kapasitif: $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(1.000)(2 \times 10^{-6})}$

$$X_C = \frac{1}{2 \times 10^{-3}} = \frac{10^3}{2} = 500 \Omega$$

$$Z = \sqrt{300^2 + (900 - 500)^2}$$

$$= \sqrt{90.000 + 160.000}$$

$$= \sqrt{250.000}$$

$$Z = 500 \Omega$$

- b. Arus efektif

$$I_{\text{ef}} = \frac{V}{Z} = \frac{50 \text{ V}}{500 \Omega} = 0,1 \text{ A}$$

c. $V_L = I \cdot X_L = (0,1 \text{ A})(900 \Omega) = 90 \text{ volt}$

d. $V_C = I \cdot X_C = (0,1 \text{ A})(500 \Omega) = 50 \text{ volt}$

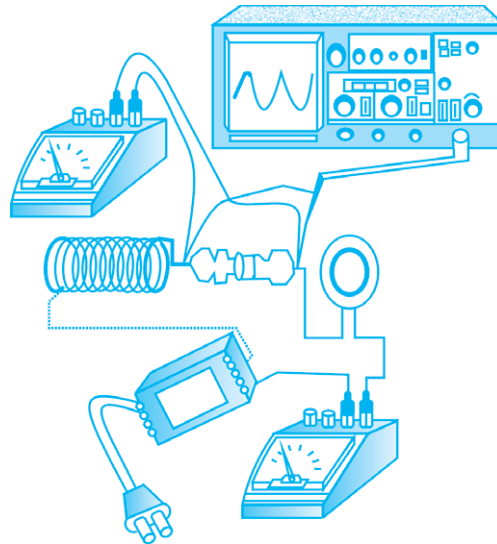
Kegiatan

Tujuan : Mengetahui rangkaian seri RLC.

Alat dan bahan : Trafo adaptor, kabel penghubung, resistor, induktor, kapasitor, amperemeter, voltmeter, dan CRO.

Cara Kerja:

1. Rangkailah sebuah rangkaian seri sesuai dengan gambar di samping.
2. Bacalah nilai beda potensial pada resistor, induktor, dan kapasitor dengan voltmeter yang tersedia.
3. Gambarlah bentuk grafik V_R , V_L , dan V_C yang ditampilkan CRO.
4. Bacalah nilai beda potensial pada resistor, induktor, dan kapasitor dengan CRO yang tersedia.
5. Carilah harga efektif berdasarkan pembacaan CRO.
6. Ulangilah langkah 2 - 5 untuk berbagai jenis resistor, induktor, dan kapasitor berdasarkan harganya.
7. Carilah nilai impedansi rangkaian.



Diskusi:

1. Apakah fase dari ketiga beda potensial pada R, L, dan C adalah sama? Mengapa demikian?
2. Jelaskan yang dimaksud impedansi rangkaian seri!
3. Tulislah kesimpulan dari percobaan yang telah kalian lakukan!

Uji Kemampuan 7.4

1. Sebuah rangkaian seri terdiri atas sebuah resistor, sebuah kapasitor, dan sebuah induktor. Rangkaian tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan AC dengan frekuensi f . Jika tegangan efektif yang melintasi resistor, kapasitor, dan induktor masing-masing adalah 5 volt, 10 volt, dan 7 volt. Tentukan:
 - a. tegangan sumber AC,
 - b. faktor daya!
2. Sebuah rangkaian seri yang terdiri atas resistor noninduktif $100\ \Omega$, sebuah kumparan dengan induktansi $0,10\ \text{H}$ dan hambatan yang dapat diabaikan, dan kapasitor $20\ \mu\text{F}$, dihubungkan pada sumber daya $110\ \text{V}/60\ \text{Hz}$. Tentukan:
 - (a) arus, (b) daya yang hilang, (c) sudut fase antara arus dan sumber tegangan, dan (d) pembacaan voltmeter pada ketiga elemen tersebut!



B. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

Daya sesaat pada sebuah rangkaian seperti yang terlihat pada rangkaian seri RLC seperti ditunjukkan Gambar 7.7 dirumuskan:

$$P_{(t)} = V_{(t)} \cdot I_{(t)} \\ = (V_m \sin \omega t)(I_m \sin(\omega t - \phi)) \dots\dots\dots (7.27)$$

Jika kita mengekspansikan faktor $\sin(\omega t - \phi)$ menurut sebuah identitas trigonometri, maka diperoleh:

$$P_{(t)} = (V_m I_m)(\sin \omega t)(\sin \omega t \cos \phi - \cos \omega t \sin \phi) \\ = V_m I_m \sin^2 \omega t \cos \phi - V_m I_m \sin \omega t \cos \omega t \sin \phi \dots\dots (7.28)$$

Nilai $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}$ dan $\sin \omega t \cos \omega t = 0$, maka dari persamaan (7.28) kita dapat mencari $P_{(t)} = P_{av}$ yaitu:

$$P_{av} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \phi + 0 \dots\dots\dots (7.29)$$

diketahui $V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ dan $I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, maka persamaan (7.29) menjadi:

$$P_{av} = V_{rms} \cdot I_{rms} \cos \phi \dots\dots\dots (7.30)$$

Dengan $\cos \phi$ menyatakan faktor daya. Untuk kasus seperti pada Gambar 7.3, memperlihatkan sebuah beban hambatan murni, dengan $\phi = 0$, sehingga persamaan (7.30) menjadi:

$$P_{av} = V_{rms} \cdot I_{rms} \dots\dots\dots (7.31)$$

Contoh Soal

$R = 400 \, \Omega$ $L = 0,5 \, H$ $C = 5 \, \mu F$



$$V = 100 \sin 1000t$$

Sumber tegangan bolak-balik dengan $V = (100 \sin 1000t)$ volt, dihubungkan dengan rangkaian seri RLC seperti gambar. Bila $R = 400 \, \Omega$, $C = 5 \, \mu F$, dan $L = 0,5 \, H$, tentukan daya pada rangkaian!

Penyelesaian:

Diketahui: $V = (100 \sin 1000t)$ volt

$$R = 400 \, \Omega$$

$$C = 5 \, \mu F = 5 \times 10^{-6} \, F$$

$$L = 0,5 \, H$$

Ditanya: $P = \dots ?$

Jawab:

Menentukan impedansi rangkaian

Persamaan umum $V = V_m \sin \omega t$

$$V = (100 \sin 1000t) \text{ volt}$$

maka, $V_m = 100 \text{ volt}$

$$\omega = 1.000 \text{ rad/s}$$

$$X_L = \omega \cdot L$$

$$= (1.000 \text{ rad/s})(0,5 \text{ H}) = 500 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{(1.000)(5 \times 10^{-6})} = \frac{1}{5 \times 10^{-3}} = \frac{10^3}{5}$$

$$X_C = 200 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$= \sqrt{400^2 + (500 - 200)^2}$$

$$= \sqrt{160.000 + 90.000}$$

$$= \sqrt{250.000}$$

$$Z = 500 \Omega$$

$$\text{Kuat arus, } I = \frac{V_m}{Z} = \frac{100}{500} = 0,2 \text{ A}$$

$$\text{Faktor daya, } \phi = \frac{400}{500} = 0,8$$

$$\phi = 37^\circ$$

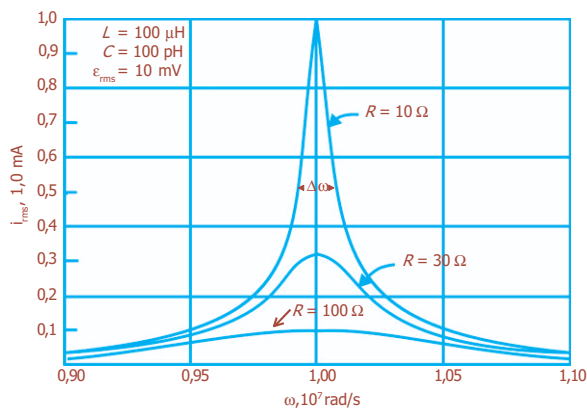
$$\begin{aligned} \text{Dayanya, } P &= V_m \cdot I_m \cdot \cos \phi \\ &= (100)(0,2)(0,8) \\ &= 16 \text{ watt} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 7.5

1. Rangkaian RLC dengan $L = 4 \text{ H}$; $C = 4 \mu\text{F}$; dan $R = 40 \Omega$, digerakkan oleh sebuah generator dengan ggl maksimum 200 volt dan frekuensi 60 Hz. Hitunglah daya rata-rata yang diberikan oleh generator tersebut!
2. Sebuah sumber tegangan arus bolak-balik 120 V dihubungkan dengan sebuah induktor murni 0,700 H.
 - a. Tentukan arus yang melalui induktor tersebut jika frekuensi sumbernya 60 Hz dan 60 kHz!
 - b. Berapakah daya yang hilang di dalam induktor?



C. Resonansi pada Rangkaian Arus Bolak-Balik



Gambar 7.10 Resonansi dalam rangkaian RLC untuk tiga nilai R berbeda.

Rangkaian RLC pada Gambar 7.7 memiliki suatu frekuensi alami dari osilasi, dan menganggap pada rangkaian tersebut bekerja suatu pengaruh luar, yang di dalam kasus ini adalah tegangan gerak elektrik bolak-balik yang diberikan dalam persamaan $V = V_m \sin \omega t$, dengan ω adalah frekuensi sudut dari gaya penggerak. Respons maksimum, I_{rms} , terjadi bila frekuensi sudut ω dari gaya penggerak tersebut persis menyamai frekuensi alami ω_0 dari osilasi untuk osilasi bebas dari rangkaian tersebut.

Nilai maksimum I_{rms} terjadi bila $X_L = X_C$ dan mempunyai:

$$I_{rms, maks} = \frac{V_{rms}}{R} \dots\dots\dots (7.32)$$

I_{rms} hanya dibatasi oleh resistansi rangkaian. Jika $R \rightarrow 0$, $I_{rms, maks} \rightarrow \infty$.

Dengan memanfaatkan bahwa $X_L = X_C$, maka:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (7.33)$$

Nilai $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ menyatakan sudut alami ω_0 untuk rangkaian dari Gambar 7.7, yaitu nilai I_{rms} maksimum terjadi jika frekuensi ω dari gaya penggerak adalah tepat sama dengan frekuensi alami ω_0 , yang dinyatakan:

$$\omega = \omega_0 \dots\dots\dots (7.34)$$

Kondisi pada persamaan (7.34) disebut *resonansi*. Resonansi pada rangkaian RLC dari Gambar 7.7 ditunjukkan oleh Gambar 7.8, di mana grafik hubungan I_{rms} terhadap ω untuk nilai-nilai V_m , C , dan L yang tetap terjadi tetapi untuk nilai R yang berlainan.

Dalam kehidupan sehari-hari kita menerapkan prinsip ini pada saat menyetel sebuah radio. Dengan memutar kenop (tombol), kita menyesuaikan frekuensi alami ω_0 dari sebuah rangkaian dalam radio dengan frekuensi ω dari sinyal yang dipancarkan oleh antena stasiun, sampai persamaan (7.34) terpenuhi.



Sumber: *Tempo*, 2005

Gambar 7.11 Menyetel radio merupakan penerapan prinsip resonansi.

Contoh Soal

Hitunglah frekuensi resonansi dari sebuah rangkaian dengan hambatan yang diabaikan mengandung induktansi 40 mH dan kapasitansi 600 pF!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned}\text{Diketahui: } L &= 40 \text{ mH} = 40 \times 10^{-3} \text{ H} \\ C &= 600 \text{ pF} = 600 \times 10^{-12} \text{ F}\end{aligned}$$

$$\text{Ditanyakan: } f_0 = \dots?$$

$$\text{Jawab: } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(40 \times 10^{-3} \text{ H})(600 \times 10^{-12} \text{ F})}} = 3,2 \times 10^4 \text{ Hz.}$$

Uji Kemampuan 7.6

Seorang penguji memiliki kumparan dengan induktansi 3 mH dan berkeinginan untuk membuat suatu rangkaian yang frekuensi resonansinya adalah 1 mHz. Berapakah seharusnya nilai kapasitor yang digunakan?

Percikan Fisika

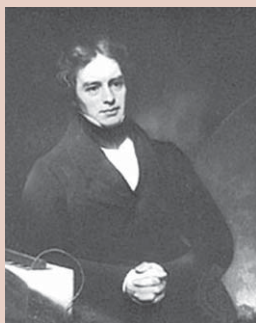


Memilih Gelombang Radio

Dalam rangkaian sebuah radio penerima, kapasitor dapat berfungsi sebagai pemilih gelombang radio. Suatu nilai kapasitansi tertentu berhubungan dengan panjang gelombang yang diterima radio. Nilai kapasitansi pada kapasitor dalam rangkaian sebuah radio dapat diubah. Kapasitor yang memiliki nilai kapasitansi yang dapat diubah disebut kapasitor variabel.

Fiesta

Fisikawan Kita



Michael Faraday (1791 - 1867)

Ahli fisika dan kimia berkebangsaan Inggris, yang lahir di Newington Butts pada tanggal 22 September 1791 dan meninggal pada tanggal 25 Agustus 1867 di Hampton Court. Ia adalah asisten Davy dan Fellow dari Royal Society, yang sekaligus direktur Royal Institut. Penemuannya antara lain benzen benzol (1825), induksi elektromagnetik (1831), Hukum Elektrolisis (1833), pengaruh zantara terhadap gejala elektrostatika (1837), dan efek Faraday (1845).

- * Arus bolak-balik adalah arus yang arahnya dalam rangkaian berubah-ubah dengan selang yang teratur, yang ditimbulkan oleh gaya gerak listrik yang berubah-ubah.
- * Tegangan dan arus yang dihasilkan oleh generator AC berbentuk sinusoida, yang dinyatakan: $V = V_m \sin \omega t$
 $I = I_m \sin \omega t$
- * Fasor menyatakan vektor berputar yang mewakili besaran yang berubah-ubah secara sinusoida. Panjang vektor menunjukkan amplitudo besaran.
- * Pada rangkaian resistor berlaku hubungan:
 $V_m = I_m R$
- * Dalam rangkaian induktif berlaku hubungan:
 $V_m = I_m X_L$
- * Pada rangkaian kapasitor berlaku hubungan:
 $V_m = I_m X_C$
- * Rangkaian seri RLC mempunyai persamaan:
 $V_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Jika ϕ adalah beda sudut fase antara tegangan dan arus, maka:
 $\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R}$
- * Daya pada rangkaian AC didefinisikan dalam persamaan:
 $P_{av} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \phi = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$
- * Resonansi pada rangkaian AC terjadi jika frekuensi sudut sama dengan frekuensi alami.
 $\omega = \omega_0$ dengan ω_0 setara dengan $\frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Tegangan suatu rangkaian ketika diukur dengan osiloskop adalah 220 volt. Bila tegangan rangkaian tersebut diukur lagi dengan menggunakan voltmeter AC, maka angka yang ditunjukkannya adalah
 - a. 110 V
 - b. $110\sqrt{2}$ V
 - c. $220\sqrt{2}$ V
 - d. $220\sqrt{3}$ V
 - e. 440 V

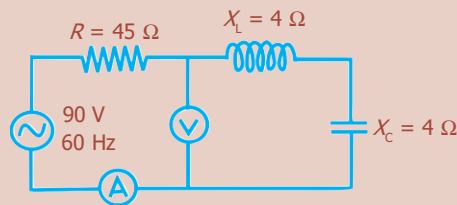
2. Pada rangkaian arus bolak-balik yang hanya mengandung induktor murni, maka antara arus dan tegangan berlaku
 - a. V sefase dengan I
 - b. V mendahului I sebesar $\frac{\pi}{2}$
 - c. V mendahului I sebesar π
 - d. I mendahului V sebesar $\frac{\pi}{2}$
 - e. I mendahului V sebesar π
3. Sebuah induktor 50 mH dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik yang memiliki frekuensi sudut 300 rad/s. Besar reaktansi induktif adalah
 - a. 25 Ω
 - b. 20 Ω
 - c. 15 Ω
 - d. 1,5 Ω
 - e. 0,15 Ω
4. Sebuah hambatan murni dialiri arus bolak-balik $I = I_m \sin \omega t$. Pada saat sudut fasenya 30° menghasilkan tegangan 100 volt. Jika sudut fasenya 135° , maka tegangan yang dihasilkan adalah
 - a. 50 volt
 - b. 100 volt
 - c. $100\sqrt{2}$ volt
 - d. $100\sqrt{3}$ volt
 - e. 200 volt
5. Rangkaian seri RLC dengan $R = 1.000 \Omega$; $L = 0,5 \text{ H}$; dan $C = 0,2 \mu\text{F}$, dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik yang frekuensi sudutnya 500 rad/s. Hasil impedansi rangkaian tersebut mendekati
 - a. 100 Ω
 - b. 500 Ω
 - c. 1.600 Ω
 - d. 1.800 Ω
 - e. 2.600 Ω
6. Sebuah kapasitor dengan kapasitas 100 μF dihubungkan dengan tegangan arus bolak-balik 110 V/ 50 Hz. Reaktansi kapasitif yang timbul pada kapasitor adalah

a. $\frac{500}{\pi} \Omega$	d. $\frac{50}{2\pi} \Omega$
b. $\frac{500}{2\pi} \Omega$	e. $\frac{5}{\pi} \Omega$
c. $\frac{50}{\pi} \Omega$	

7. Lima buah kapasitor, masing-masing kapasitasnya $2C$ F dirangkai seri. Rangkaian ini dipasang pada sumber tegangan bolak-balik dengan kecepatan sudut ω rad/s. Reaktansi kapasitifnya adalah
- $\frac{5}{2\omega C} \Omega$
 - $\frac{2}{5\omega C} \Omega$
 - $\frac{5\omega C}{2} \Omega$
 - $\frac{2\omega C}{5} \Omega$
 - $\frac{1}{10\omega C} \Omega$
8. Rangkaian seri RLC dihubungkan dengan sumber tegangan dan memenuhi persamaan $V = (100\sqrt{2} \sin 100t)$ V. Besar hambatan murni 600Ω , induktansi diri kumparan 2 H, dan kapasitas kapasitor $10 \mu\text{F}$. Daya rangkaian adalah ...
- 6 W
 - 8 W
 - 10 W
 - 12 W
 - 14 W
9. Jika dalam rangkaian seri RLC terjadi resonansi, maka
- $X_L = \frac{1}{X_C}$ dan Z maksimum
 - $X_L = X_C$ dan Z maksimum
 - $L = \frac{1}{\omega C}$ dan $Z = R$
 - $L = \frac{1}{\omega C}$ dan Z maksimum
 - $X_L = \frac{1}{\omega C}$ dan Z minimum
10. Rangkaian seri $R = 40 \Omega$; $L = 0,1$ H; dan $C = 100 \mu\text{F}$ dipasang pada sumber tegangan bolak-balik dengan frekuensi $\frac{100}{\pi}$ Hz. Impedansi rangkaian adalah ...
- 20Ω
 - 30Ω
 - 40Ω
 - 50Ω
 - 110Ω

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

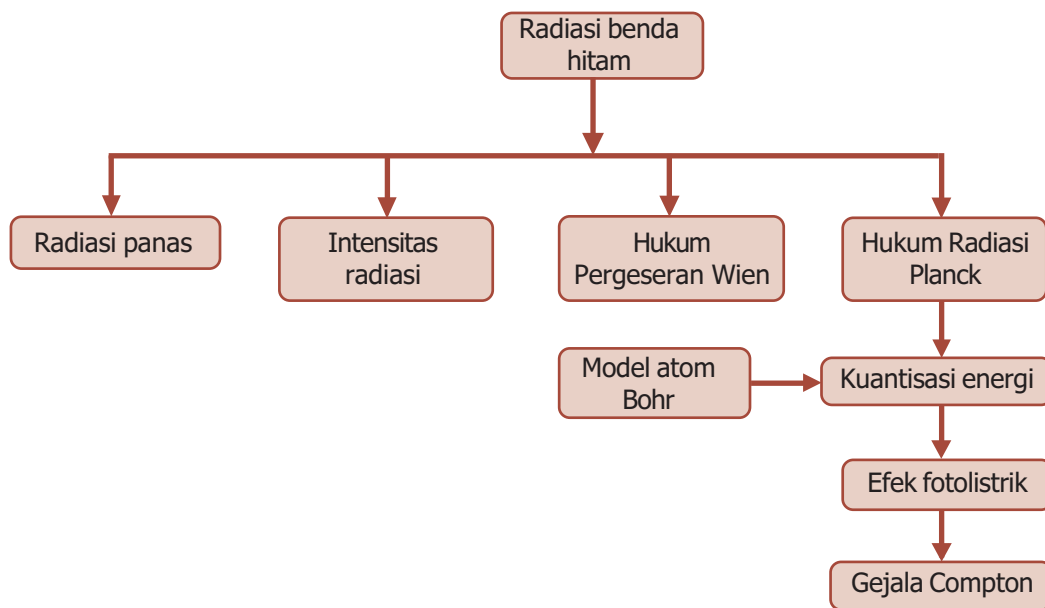
1. Sebuah resistor, sebuah kapasitor, dan sebuah induktor disusun seri dan dihubungkan dengan sebuah sumber AC dengan frekuensi f . Tegangan efektif yang melintasi resistor, kapasitor, dan induktor berturut-turut adalah 10 V, 20 V, dan 14 V. Hitunglah:
 - a. tegangan sumber AC,
 - b. sudut fase antara tegangan dan arus,
 - c. faktor daya!
2. Frekuensi resonansi suatu rangkaian seri LC adalah 10^5 Hz. Kapasitansi C memiliki nilai $0,1 \mu\text{F}$ dan hambatan komponen dapat dianggap kecil. Tentukan induktansi L rangkaian!
3. Suatu rangkaian seri RLC dengan $L = 0,4$ H diberi tegangan sebesar 200 V, $\frac{50}{\pi}$ Hz, hingga menghasilkan daya maksimum. Berapa besar kapasitas kapasitornya?
4. Rangkaian seri RLC dengan $R = 1.600 \Omega$, $L = 400$ mH, dan $C = 10 \mu\text{F}$ dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik yang frekuensinya dapat diatur. Hitunglah:
 - a. frekuensi resonansi rangkaian,
 - b. impedansi rangkaian dalam keadaan resonansi!
- 5.



Berdasarkan gambar di atas, tentukan arus dan tegangan yang ditunjukkan oleh amperemeter (A) dan voltmeter (V)!

PETA KONSEP

Bab 8 Radiasi Benda Hitam



BAB

8

RADIASI BENDA HITAM



- Pakaian hitam menyerap semua cahaya yang mengenainya.

Sumber: *CD ClipArt*

Pernahkah kalian memakai pakaian hitam di siang hari yang panas? Jika pernah bagaimana rasanya? Pasti sangat panas bukan, mengapa? Ini karena warna hitam menyerap semua cahaya atau sinar yang jatuh mengenainya sehingga benda tersebut akan menjadi panas. Inilah yang disebut radiasi benda hitam. Untuk mengetahuinya ikuti pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

benda hitam,
Hukum Pergeseran Wien,
Hukum Stefan-Boltzmann,
panjang gelombang, radiasi,
suhu mutlak

Pernahkah kalian melihat lampu pijar? Jika kalian perhatikan, pada bagian filamen lampu berwarna kuning keputih-putihan padahal lampu berwarna biru. Mengapa hal ini terjadi? Ini terjadi karena suhu lampu pijar di atas 2.000 K. Semua benda yang berada pada suhu di atas 2.000 K akan memancarkan cahaya putih.

Dalam perambatan cahaya melalui ruang hampa, cahaya dianggap sebagai gelombang, seperti pada peristiwa interferensi dan difraksi. Adapun dalam peristiwa interaksi cahaya dengan atom maupun molekul, cahaya dianggap sebagai partikel. Peristiwa tersebut antara lain radiasi panas, efek fotolistrik, dan gejala Compton, yang akan kalian pelajari dalam pembahasan berikut ini.



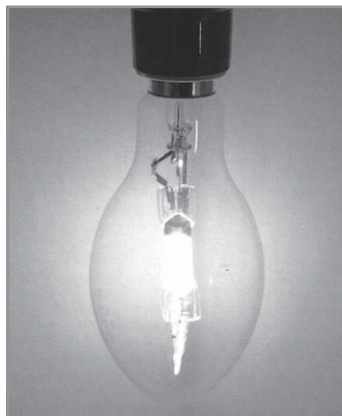
A. Radiasi Panas dan Intensitas Radiasi

1. Radiasi Panas

Radiasi panas adalah radiasi yang dipancarkan oleh sebuah benda sebagai akibat suhunya. Setiap benda memancarkan radiasi panas, tetapi pada umumnya, kalian dapat melihat sebuah benda, karena benda itu memantulkan cahaya yang datang padanya, bukan karena benda itu memancarkan radiasi panas. Benda baru terlihat karena meradiasikan panas jika suhunya melebihi 1.000 K. Pada suhu ini benda mulai berpijar merah seperti kumparan pemanas sebuah kompor listrik. Pada suhu di atas 2.000 K benda berpijar kuning atau keputih-putihan, seperti pijar putih dari filamen lampu pijar. Begitu suhu benda terus ditingkatkan, intensitas relatif dari spektrum cahaya yang dipancarkannya berubah. Hal ini menyebabkan pergeseran warna-warna spektrum yang diamati, yang dapat digunakan untuk menentukan suhu suatu benda.

Secara umum bentuk terperinci dari spektrum radiasi panas yang dipancarkan oleh suatu benda panas bergantung pada komposisi benda itu. Walaupun demikian, hasil eksperimen menunjukkan bahwa ada satu kelas benda panas yang memancarkan spektra panas dengan karakter universal. Benda ini adalah benda hitam atau *black body*.

Benda hitam didefinisikan sebagai sebuah benda yang menyerap semua radiasi yang datang padanya. Dengan kata lain, tidak ada radiasi yang dipantulkan keluar dari benda hitam. Jadi, benda hitam mempunyai harga absorptansi dan emisivitas yang besarnya sama dengan satu.



Sumber: *Jendela Iptek Cahaya*,
PT Balai Pustaka, 2000

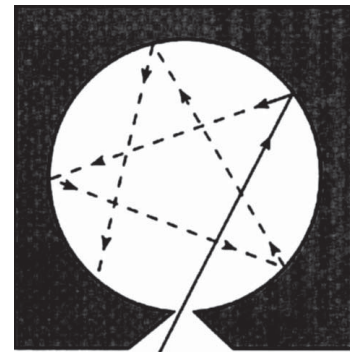
Gambar 8.1 Filamen lampu pijar meradiasikan panas pada suhu di atas 2.000 K.

BETA^B Berita Fisika

Benda hitam sempurna adalah pemancar kalor radiasi paling baik ($e = 1$). Contoh yang mendekati benda hitam sempurna adalah kotak tertutup rapat yang dilubangi dan lubang udara (ventilasi) rumah.

Seperti yang telah kalian ketahui, bahwa emisivitas (daya pancar) merupakan karakteristik suatu materi, yang menunjukkan perbandingan daya yang dipancarkan per satuan luas oleh suatu permukaan terhadap daya yang dipancarkan benda hitam pada temperatur yang sama. Sementara itu, absorptansi (daya serap) merupakan perbandingan fluks pancaran atau fluks cahaya yang diserap oleh suatu benda terhadap fluks yang tiba pada benda itu.

Benda hitam ideal digambarkan oleh suatu rongga hitam dengan lubang kecil. Sekali suatu cahaya memasuki rongga itu melalui lubang tersebut, berkas itu akan dipantulkan berkali-kali di dalam rongga tanpa sempat keluar lagi dari lubang tadi. Setiap kali dipantulkan, sinar akan diserap dinding-dinding berwarna hitam. Benda hitam akan menyerap cahaya sekitarnya jika suhunya lebih rendah daripada suhu sekitarnya dan akan memancarkan cahaya ke sekitarnya jika suhunya lebih tinggi daripada suhu sekitarnya. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 8.1. Benda hitam yang dipanasi sampai suhu yang cukup tinggi akan tampak membara.



Gambar 8.2 Pemantulan yang terjadi pada benda hitam.

2. Intensitas Radiasi

Radiasi benda hitam adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh sebuah benda hitam. Radiasi ini menjangkau seluruh daerah panjang gelombang. Distribusi energi pada daerah panjang gelombang ini memiliki ciri khusus, yaitu suatu nilai maksimum pada panjang gelombang tertentu. Letak nilai maksimum tergantung pada temperatur, yang akan bergeser ke arah panjang gelombang pendek seiring dengan meningkatnya temperatur.

Pada tahun 1879 seorang ahli fisika dari Austria, Josef Stefan melakukan eksperimen untuk mengetahui karakter universal dari radiasi benda hitam. Ia menemukan bahwa daya total per satuan luas yang dipancarkan pada semua frekuensi oleh suatu benda hitam panas (intensitas total) adalah sebanding dengan pangkat empat dari suhu mutlaknya. Sehingga dapat dirumuskan:

$$I_{\text{total}} = \sigma \cdot T^4 \dots\dots\dots (8.1)$$

dengan I menyatakan intensitas radiasi pada permukaan benda hitam pada semua frekuensi, T adalah suhu mutlak benda, dan σ adalah tetapan Stefan-Boltzman, yang bernilai $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Untuk kasus benda panas yang bukan benda hitam, akan memenuhi hukum yang sama, hanya diberi tambahan koefisien emisivitas yang lebih kecil daripada 1 sehingga:

$$I_{\text{total}} = e \cdot \sigma \cdot T^4 \dots\dots\dots (8.2)$$

Intensitas merupakan daya per satuan luas, maka persamaan (8.2) dapat ditulis sebagai:

$$\frac{P}{A} = e \sigma T^4 \dots\dots\dots (8.3)$$

dengan:

P = daya radiasi (W)

A = luas permukaan benda (m^2)

e = koefisien emisivitas

T = suhu mutlak (K)

Beberapa tahun kemudian, berdasarkan teori gelombang elektromagnetik cahaya, Ludwig Boltzmann (1844 - 1906) secara teoritis menurunkan hukum yang diungkapkan oleh Joseph Stefan (1853 - 1893) dari gabungan termodinamika dan persamaan-persamaan Maxwell. Oleh karena itu, persamaan (8.2) dikenal juga sebagai Hukum Stefan-Boltzmann, yang berbunyi:

“Jumlah energi yang dipancarkan per satuan permukaan sebuah benda hitam dalam satuan waktu akan berbanding lurus dengan pangkat empat temperatur termodinamikanya”.

Contoh Soal

Lampu pijar dapat dianggap berbentuk bola. Jari-jari lampu pijar pertama 3 kali jari-jari lampu pijar kedua. Suhu lampu pijar pertama 67°C dan suhu lampu pijar kedua 407°C . Tentukan perbandingan daya radiasi lampu pertama terhadap lampu kedua!

Besaran yang diketahui:

$$T_1 = (67 + 273) \text{ K} = 340 \text{ K}$$

$$T_2 = (407 + 273) \text{ K} = 680 \text{ K}$$

$$R_1 = 3 R_2$$

Perbandingan daya radiasi lampu pertama terhadap lampu kedua:

$$\begin{aligned}\frac{P_1}{P_2} &= \frac{e \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4}{e \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot T_2^4} \\ &= \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4 \\ &= \left(\frac{3R_2}{R_2}\right)^2 \left(\frac{340}{680}\right)^4 \\ &= 9 \times \left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{9}{16} = 0,56\end{aligned}$$

Uji Kemampuan 8.1

Suhu lampu pijar A dan B masing-masing 32 °C dan 43 °C, dan jari-jari lampu A adalah 4 kali jari-jari lampu B. Berapakah nilai perbandingan antara daya kalor radiasi lampu A dan B?



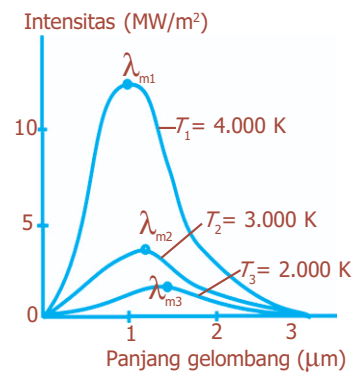
B. Hukum Pergeseran Wien

Untuk sebuah benda hitam, berlaku suatu hubungan antara panjang gelombang dengan suhu mutlak yang dinyatakan:

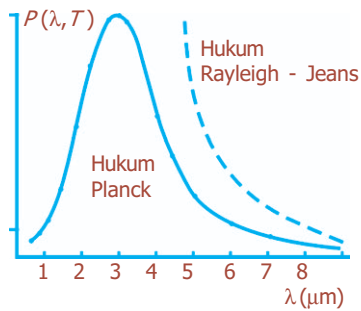
$$\lambda_m \cdot T = C \dots \dots \dots (8.4)$$

dengan λ_m merupakan panjang gelombang yang sesuai dengan radiasi energi maksimum, T adalah temperatur termodinamik benda, dan C adalah tetapan pergeseran Wien ($2,898 \times 10^{-3}$ mK). Hubungan tersebut disebut *Hukum pergeseran Wien*, yang dinyatakan oleh Wilhelm Wien (1864 - 1928).

Gambar 8.3 memperlihatkan grafik hubungan antara intensitas radiasi dan panjang gelombang radiasi benda hitam ideal pada tiga temperatur yang berbeda. Grafik ini dikenal sebagai grafik distribusi spektrum. Intensitas merupakan daya yang dipancarkan per satuan panjang gelombang. Ini merupakan fungsi panjang gelombang λ maupun temperatur T , dan disebut distribusi spektrum. Dari grafik terlihat bahwa puncak kurva penyebaran energi spektrum bergeser ke arah ujung spektrum panjang gelombang pendek dengan semakin tingginya temperatur.



Gambar 8.3 Grafik hubungan pergeseran Wien.



Gambar 8.4 Distribusi spektrum radiasi benda hitam terhadap panjang gelombang pada $T = 1.600$ K.

Fungsi distribusi spektrum $P(\lambda, T)$ dapat dihitung dari termodinamika klasik secara langsung, dan hasilnya dapat dibandingkan dengan Gambar 8.3. Hasil perhitungan klasik ini dikenal sebagai Hukum Rayleigh-Jeans yang dinyatakan:

$$P(\lambda, T) = 8\pi kT\lambda^{-4}$$

dengan k merupakan konstanta Boltzmann.

Hasil ini sesuai dengan hasil yang diperoleh secara percobaan untuk panjang gelombang yang panjang, tetapi tidak sama pada panjang gelombang pendek. Begitu λ mendekati nol, fungsi $P(\lambda, T)$ yang ditentukan secara percobaan juga mendekati nol, tetapi fungsi yang dihitung mendekati tak terhingga karena sebanding dengan λ^{-4} . Dengan demikian, yang tak terhingga yang terkonsentrasi dalam panjang gelombang yang sangat pendek. Hasil ini dikenal sebagai katastrof ultraviolet.



C. Hukum Radiasi Planck

Pada tahun 1900, fisikawan Jerman, Max Planck, mengumumkan bahwa dengan membuat suatu modifikasi khusus dalam perhitungan klasik dia dapat menjabarkan fungsi $P(\lambda, T)$ yang sesuai dengan data percobaan pada seluruh panjang gelombang.

Hukum radiasi Planck menunjukkan distribusi (penyebaran) energi yang dipancarkan oleh sebuah benda hitam. Hukum ini memperkenalkan gagasan baru dalam ilmu fisika, yaitu bahwa energi merupakan suatu besaran yang dipancarkan oleh sebuah benda dalam bentuk paket-paket kecil terputus-putus, bukan dalam bentuk pancaran molar. Paket-paket kecil ini disebut **kuanta** dan hukum ini kemudian menjadi dasar teori kuantum.

Rumus Planck menyatakan energi per satuan waktu pada frekuensi ν per satuan selang frekuensi per satuan sudut tiga dimensi yang dipancarkan pada sebuah kerucut tak terhingga kecilnya dari sebuah elemen permukaan benda hitam, dengan satuan luas dalam proyeksi tegak lurus terhadap sumbu kerucut. Pernyataan untuk intensitas jenis monokromatik I_ν adalah:

$$I_\nu = 2hc^2\nu^3 / (\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1) \dots\dots\dots (8.5)$$

dengan h merupakan tetapan Planck, c adalah laju cahaya,

k adalah tetapan Boltzmann, dan T adalah temperatur termodinamik benda hitam.

Intensitas juga dapat dinyatakan dalam bentuk energi yang dipancarkan pada panjang gelombang λ per satuan selang panjang gelombang. Pernyataan ini dapat dituliskan dalam bentuk:

$$I_{\lambda} = 2hc^2\lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (8.6)$$

Rumus Planck dibatasi oleh dua hal penting berikut ini.

1. Untuk frekuensi rendah $\nu < \frac{kT}{h}$, dan panjang gelombang yang panjang $\lambda \gg \frac{hc}{kT}$, maka akan berlaku rumus Rayleigh-Jeans.

$$I_{\nu} = 2 \cdot c^2 \cdot \nu^2 \cdot k \cdot T$$

atau

$$I_{\lambda} = 2 \cdot c \cdot \lambda^4 \cdot k \cdot T$$

Pada persamaan tersebut tidak mengandung tetapan Planck, dan dapat diturunkan secara klasik dan tidak berlaku untuk frekuensi tinggi, seperti energi tinggi, karena sifat kuantum foton harus pula diperhitungkan.

2. Pada frekuensi tinggi $\nu \gg \frac{kT}{h}$, dan pada panjang gelombang yang pendek $\lambda \ll \frac{hc}{kT}$, maka akan berlaku rumus Wien:

$$I_{\nu} = 2 \cdot h \cdot c^2 \cdot \nu^3 \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right)$$

atau


$$I_{\lambda} = 2 \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-hc}{\lambda kT}\right)$$

Max Planck menyatakan dua anggapan mengenai energi radiasi sebuah benda hitam.

1. Pancaran energi radiasi yang dihasilkan oleh getaran molekul-molekul benda dinyatakan oleh:

$$E = n \cdot h \cdot \nu \dots\dots\dots (8.7)$$

dengan ν adalah frekuensi, h adalah sebuah konstanta Planck yang nilainya $6,626 \times 10^{-34}$ Js, dan n adalah bilangan bulat yang menyatakan bilangan kuantum.



Konstanta Planck h merupakan tetapan fundamental yang besarnya sama dengan perbandingan antara energi E dari suatu kuantum energi terhadap frekuensinya.

2. Energi radiasi diserap dan dipancarkan oleh molekul-molekul secara diskret yang disebut kuantum atau foton. Energi radiasi ini terkuantisasi, di mana energi untuk satu foton adalah:

$$E = h \cdot \nu \dots\dots\dots (8.8)$$

dengan h merupakan konstanta perbandingan yang dikenal sebagai konstanta Planck. Nilai h ditentukan oleh Planck dengan menyesuaikan fungsinya dengan data yang diperoleh secara percobaan. Nilai yang diterima untuk konstanta ini adalah:

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js} = 4,136 \times 10^{-34} \text{ eVs.}$$

Planck belum dapat menyesuaikan konstanta h ini ke dalam fisika klasik, hingga Einstein menggunakan gagasan serupa untuk menjelaskan efek fotolistrik.

Contoh Soal

Berapakah panjang gelombang sebuah radiasi foton yang memiliki energi $3,05 \times 10^{-19} \text{ Js}$? (Diketahui konstanta Planck, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ dan cepat rambat cahaya, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } E &= 3,05 \times 10^{-19} \text{ Js} \\ h &= 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js} \\ c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\text{Ditanya: } \lambda = \dots ?$$

Jawab:

$$E = h \cdot f$$

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E}$$

$$= \frac{(6,626 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{3,05 \times 10^{-19}}$$

$$= 6,52 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 652 \text{ nm}$$

Uji Kemampuan 8.2

1. Sebuah lampu natrium 20 W berwarna kuning ($\lambda = 589 \text{ nm}$). Berapa banyak foton yang dipancarkan lampu itu setiap sekon?
2. Jika suatu beda potensial 220 volt diberikan di antara anoda dan katoda, dan seluruh energi dari elektron yang dipercepat diubah menjadi foton sinar-X, berapakah panjang gelombang sinar-X?



D. Efek Fotolistrik dan Efek Compton

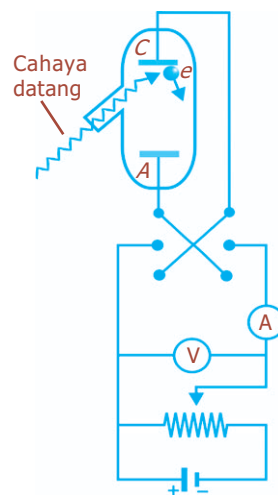
1. Efek Fotolistrik

Pada tahun 1905, Einstein menggunakan gagasan Planck tentang kuantisasi energi untuk menjelaskan efek fotolistrik. Efek fotolistrik ditemukan oleh Hertz pada tahun 1887 dan telah dikaji oleh Lenard pada tahun 1900. Gambar 8.5 menunjukkan diagram sketsa alat dasarnya.

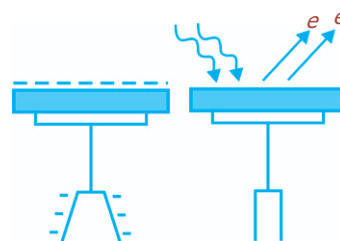
Apabila cahaya datang pada permukaan logam katoda C yang bersih, elektron akan dipancarkan. Jika elektron menumbuk anoda A , terdapat arus dalam rangkaian luarnya. Jumlah elektron yang dipancarkan yang dapat mencapai elektroda dapat ditingkatkan atau diturunkan dengan membuat anoda positif atau negatif terhadap katodanya. Apabila V positif, elektron ditarik ke anoda. Apabila V negatif, elektron ditolak dari anoda. Hanya elektron dengan energi kinetik $\frac{1}{2}mv^2$ yang lebih besar dari eV_0 kemudian dapat mencapai anoda. Potensial V_0 disebut potensial penghenti. Potensial ini dihubungkan dengan energi kinetik maksimum elektron yang dipancarkan oleh:

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\text{maks}} = e \cdot V_0 \dots\dots\dots (8.9)$$

Percobaan yang lebih teliti dilakukan oleh Milikan pada tahun 1923 dengan menggunakan sel fotolistrik. Keping katoda dalam tabung ruang hampa dihubungkan dengan sumber tegangan searah. Kemudian, pada katoda dikenai cahaya berfrekuensi tinggi. Maka akan tampak adanya arus listrik yang mengalir karena elektron dari katoda menuju anoda. Setelah katoda disinari berkas cahaya, galvanometer ternyata menyimpang. Hal ini menunjukkan bahwa ada arus listrik yang mengalir dalam rangkaian.



Gambar 8.5 Sketsa alat untuk mengkaji efek elektromagnetik.



Gambar 8.6 Efek fotolistrik.

Einstein telah menjelaskan bahwa untuk mengeluarkan elektron dari permukaan logam dibutuhkan energi ambang. Jika radiasi elektromagnet yang terdiri atas foton mempunyai energi yang lebih besar dibandingkan energi ambang, maka elektron akan lepas dari permukaan logam. Akibatnya energi kinetik maksimum dari elektron dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Ek = hf - hf_0 \dots \dots \dots (8.10)$$

dengan:

f, f_0 = frekuensi cahaya dan frekuensi ambang (Hz)

h = konstanta Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ Js)

Ek = energi kinetik maksimum elektron (J)

Contoh Soal

Frekuensi ambang suatu logam sebesar $8,0 \times 10^{14}$ Hz dan logam tersebut disinari dengan cahaya yang memiliki frekuensi 10^{15} Hz. Jika tetapan Planck $6,6 \times 10^{-34}$ Js, tentukan energi kinetik elektron yang terlepas dari permukaan logam tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $f_0 = 8,0 \times 10^{14}$ Hz

$f = 10^{15}$ Hz

$h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js

Ditanya: $Ek = \dots?$

Jawab: $Ek = hf - hf_0$
 $= 6,6 \times 10^{-34}(10^{15} - (8,0 \times 10^{14}))$
 $= 1,32 \times 10^{-19}$ J

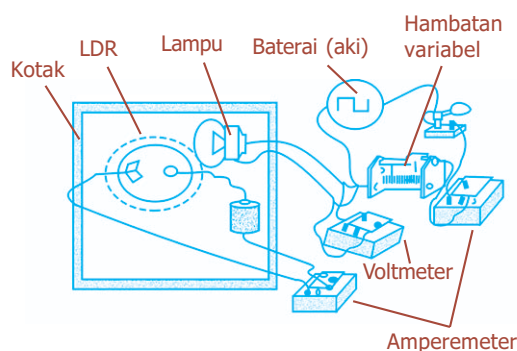
Kegiatan

Tujuan : Melakukan percobaan efek fotolistrik sederhana.

Alat dan bahan : LDR sebagai pengganti tabung efek fotolistrik, baterai, lampu, resistor variabel, pembangkit listrik, amperemeter, voltmeter, pemutus arus.

Cara Kerja:

1. Rangkailah model alat efek fotolistrik seperti gambar.
2. Dalam kondisi rangkaian pembangkit cahaya *off* atau kondisi tanpa chif catatlah harga yang ditunjukkan oleh amperemeter I_{LDR} , amperemeter I_{chy} , dan voltmeter V_{chy} .



- Tempatkan tahanan variabel pada posisi maksimum dan *on*-kan sakelar. Amati dan ukur harga amperemeter I_{LDR} , amperemeter I_{chy} , dan voltmeter V_{chy} .
- Geser resistor variabel hingga harga tahanan lebih kecil. Amati dan ukur harga amperemeter I_{LDR} , amperemeter I_{chy} , dan voltmeter V_{chy} .
- Ulangi langkah 4 untuk harga resistor variabel menjadi semakin kecil.
- Catatlah data yang diperoleh pada tabel berikut ini.

No.	I_{chy}	V_{chy}	I_{LDR}	Keterangan

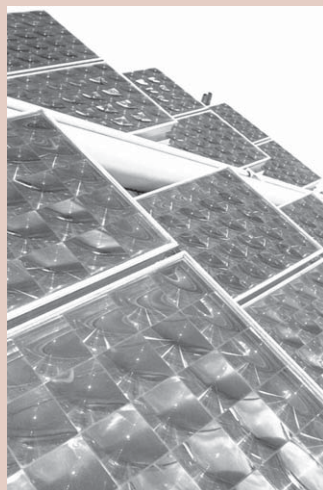
Diskusi:

- Gambarkan grafik hubungan antara I_{LDR} dan V_{chy} !
- Kesimpulan apa yang dapat diambil dari percobaan tersebut?

Uji Kemampuan 8.3

- Panjang gelombang ambang untuk kalium adalah 564 nm. Tentukan:
 - energi ambang untuk kalium,
 - potensial hentinya apabila panjang gelombang 400 nm datang pada kalium!
- Hitunglah energi dari sebuah foton cahaya biru ($\lambda = 450 \text{ nm}$) dalam satuan joule dan elektron volt (eV)!

Percikan Fisika



Sel Surya

Sel surya atau sel fotovoltaik memanfaatkan efek fotolistrik untuk membangkitkan arus listrik dari cahaya matahari. Efek fotolistrik muncul ketika cahaya tampak atau radiasi ultraviolet jatuh ke permukaan benda tertentu. Cahaya atau radiasi mendorong elektron keluar dari benda tersebut, yang jumlahnya dapat diukur dengan meteran listrik.

Keunikan dari efek fotolistrik adalah bahwa ia hanya muncul ketika cahaya yang menyerpa memiliki frekuensi di atas nilai ambang tertentu. Di bawah nilai ambang tersebut, tidak ada elektron yang terpancar keluar, tidak peduli seberapa banyak cahaya yang menyerpa benda. Frekuensi minimum yang memungkinkan kemunculan efek fotolistrik tergantung pada jenis bahan yang disinari.

2. Efek Compton

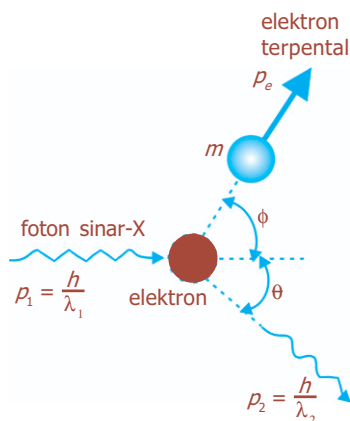
Gejala Compton merupakan gejala hamburan (efek) dari penembakan suatu materi dengan sinar-X. Efek ini ditemukan oleh Arthur Holly Compton pada tahun 1923. Jika sejumlah elektron yang dipancarkan ditembak dengan sinar-X, maka sinar-X ini akan terhambur. Hamburan sinar-X ini memiliki frekuensi yang lebih kecil daripada frekuensi semula.

Menurut teori klasik, energi dan momentum gelombang elektromagnetik dihubungkan oleh:

$$E = p \cdot c$$

$$E^2 = p^2 \cdot c^2 + (m \cdot c^2)^2 \dots\dots\dots (8.11)$$

Jika massa foton (m) dianggap nol. Gambar 8.7 menunjukkan geometri tumbukan antara foton dengan panjang gelombang λ , dan elektron yang mula-mula berada dalam keadaan diam. Compton menghubungkan sudut hamburan θ terhadap yang datang dan panjang gelombang hamburan λ_1 dan λ_2 . p_1 merupakan momentum foton yang datang dan p_2 merupakan momentum foton yang dihamburkan, serta $p \cdot c$ merupakan momentum elektron yang terpantul. Kekekalan momentum dirumuskan:



Gambar 8.7 Gejala Compton sinar-X oleh elektron.

$$p_1 = p_2 + p_e \text{ atau } p_e = p_1 - p_2$$

Dengan mengambil perkalian titik setiap sisi diperoleh:

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta \dots\dots\dots (8.12)$$

Kekekalan energi memberikan:

$$p_1 \cdot c + m \cdot c^2 = p_2 \cdot c + \sqrt{(mc^2)^2 + p_e^2 \cdot c^2}$$

Hasil Compton adalah:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m \cdot c} (1 - \cos \theta)$$

dengan:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m \cdot c} = \frac{hc}{m \cdot c^2} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{5,11 \times 10^5 \text{ eV}}$$

$$= 2,43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \text{ pm}$$

Contoh Soal

1. Jika $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$, dan $m = 9,0 \times 10^{-31} \text{ kg}$, tentukan perubahan panjang gelombang Compton!

Penyelesaian:

Diketahui: $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$
 $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$
 $m = 9,0 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Ditanya: $\Delta\lambda = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \frac{h}{m.c} (1 - \cos \theta) \\ &= \frac{6,6 \times 10^{-34}}{(9,0 \times 10^{-31}) (3,0 \times 10^8)} (1 - \cos 180^\circ) \\ &= 0,49 \times 10^{-11} \text{ m}\end{aligned}$$

2. Sebuah foton dengan panjang gelombang 0,4 nm menabrak sebuah elektron yang diam dan memantul kembali dengan sudut 150° ke arah asalnya. Tentukan kecepatan dan panjang gelombang dari foton setelah tumbukan!

Penyelesaian:

- a. Laju foton selalu merupakan laju cahaya dalam vakum, c yaitu 3×10^8 m/s.
b. Untuk mendapatkan panjang gelombang setelah tumbukan, dengan menggunakan persamaan efek Compton:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \frac{h}{m.c} (1 - \cos \theta) \\ \lambda_2 - \lambda_1 &= \frac{h}{m.c} (1 - \cos \theta) \\ \lambda_2 &= \lambda_1 + \frac{h}{m.c} (1 - \cos \theta) \\ &= 4,00 \times 10^{-10} \text{ m} + \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} (1 - \cos 150^\circ) \\ &= 4,00 \times 10^{-10} \text{ m} + (2,43 \times 10^{-12} \text{ m})(1 + 0,866) \\ &= 4,05 \times 10^{-10} \text{ m} \\ &= 4,05 \text{ \AA}\end{aligned}$$

Uji Kemampuan 8.4

1. Hitunglah persentase perubahan panjang gelombang yang diamati dalam gejala Compton dengan foton 20 keV pada $\theta = 60^\circ$!
2. Seberkas sinar-X dengan panjang gelombang 5×10^{-14} m menabrak sebuah foton yang diam ($m = 1,67 \times 10^{-27}$ kg). Jika sinar-X tersebut tersebar dengan sudut 110° , berapakah panjang gelombang sinar-X yang terhambur?
3. Compton menggunakan foton dengan panjang gelombang 0,0711 nm.
 - a. Berapakah energi foton ini?
 - b. Berapakah panjang gelombang foton yang dihamburkan pada $\theta = 180^\circ$?
 - c. Berapakah energi foton yang dihamburkan pada sudut ini?

4. Carilah momentum foton dalam eV/c dan dalam kg.m/detik, jika panjang gelombangnya:
 - a. 400 nm,
 - b. 2 nm,
 - c. 0,1 nm,
 - d. 3 cm!
5. Carilah pergeseran panjang gelombang foton yang dihamburkan pada $\theta = 60^\circ$!

Fiesta

Fisikawan Kita



Max Planck (1858 - 1947)

Ia bernama lengkap Max Karl Ernst Ludwig Planck, seorang ahli fisika teoritis dari Jerman yang berhasil menemukan Teori Kuantum dan Konstanta Planck serta Hukum Radiasi Planck. Ia belajar matematika di Universitas Munchen pada 1874. Tetapi, kemudian ia tertarik kepada fisika sehingga ia beralih ke Universitas Berlin. Menurut Teori Planck, api merah memancarkan energi yang lebih kurang (lebih dingin) daripada api biru, karena cahaya merah memiliki frekuensi yang lebih rendah daripada cahaya biru. Penemuannya ini membuatnya menerima hadiah Nobel di bidang fisika pada tahun 1918.

Kilas Balik

- ✱ Benda hitam adalah suatu benda yang permukaannya sedemikian rupa sehingga menyerap semua radiasi yang datang.
- ✱ Hukum Stefan-Boltzmann untuk radiasi benda hitam dinyatakan:

$$I_{\text{total}} = \sigma T^4$$
 Untuk benda yang bukan benda hitam, bentuk rumus stefan-Boltzman adalah:

$$I = e \cdot \sigma T^4$$
- ✱ Dari persamaan kurva spektra radiasi benda hitam diperoleh bahwa panjang gelombang yang membuat intensitas radiasi benda hitam maksimum λ_m , bergeser ke panjang gelombang yang lebih pendek begitu benda hitam menjadi lebih panas. Hubungan λ_m dengan suhu mutlak T dinyatakan oleh Hukum Pergeseran Wien, yaitu:

$$\lambda_m \cdot T = C = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK.}$$

※ Rumus radiasi Rayleigh-Jeans:

$$I_v = 2 \cdot c^2 v^2 \cdot k \cdot T$$

$$I_\lambda = 2 \cdot c \cdot \lambda^{-4} \cdot k \cdot T$$

Pernyataan tersebut ternyata hanya berlaku untuk menjelaskan radiasi benda hitam untuk panjang gelombang panjang, tetapi tidak sesuai untuk panjang gelombang yang pendek. Planck dengan teori kuantum energinya $E = n \cdot h \cdot v$, dengan n adalah bilangan bulat menyatakan rumus radiasi Planck sebagai berikut:

$$I_v = 2 \cdot h \cdot c^2 \cdot v^3 \cdot \exp\left(\frac{-hc}{kT}\right)$$

$$I_\lambda = 2 \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-hc}{\lambda kT}\right)$$

Persamaan ini sesuai dengan kurva spektra radiasi benda hitam untuk semua panjang gelombang.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Energi yang dipancarkan oleh suatu benda hitam per satuan waktu adalah ...
 - a. berbanding lurus dengan luas permukaan benda
 - b. berbanding lurus dengan suhu mutlak benda
 - c. berbanding terbalik dengan luas permukaan benda
 - d. berbanding terbalik dengan suhu mutlak benda
 - e. berbanding lurus dengan waktu pemancaran
2. Satuan SI dari tetapan Stefan-Boltzmann adalah ...
 - a. $\text{Nm}^{-2}\text{K}^{-1}$
 - b. $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$
 - c. $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{K}^{-4}$
 - d. $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
 - e. $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
3. Sebatang besi pada suhu 127°C memancarkan energi dengan laju 40 W tiap satuan waktu. Pada suhu 327°C batang besi yang sama akan memancarkan energi dengan laju ...
 - a. 81 W
 - b. 102 W
 - c. 144 W
 - d. 203 W
 - e. 251 W

4. Energi yang diradiasikan per detik oleh benda hitam pada suhu T_1 besarnya 16 kali energi yang diradiasikan per detik pada suhu T_0 . Maka T_1 besarnya adalah
- $2 T_0$
 - $2,5 T_0$
 - $3 T_0$
 - $4 T_0$
 - $5 T_0$
5. Dimensi dari tetapan Planck adalah
- MLT^{-2}
 - LT^{-2}
 - ML^2T^{-3}
 - L^2T^{-2}
 - ML^2T^{-1}
6. Energi elektron yang dipancarkan oleh permukaan yang sensitif terhadap cahaya akan meningkat jika cahaya datang menumbuk permukaan yang
- intensitasnya diperbesar
 - amplitudonya diperbesar
 - panjang gelombangnya diperpendek
 - frekuensinya diperkecil
 - sudut datangnya diperbesar
7. Jika sebuah pemancar berdaya 1.000 watt memancarkan foton tiap detiknya sebanyak 6×10^{20} buah, maka energi satu fotonnya sebesar
- $2 \times 10^{-17} \text{ J}$
 - $5 \times 10^{-17} \text{ J}$
 - $2 \times 10^{-18} \text{ J}$
 - $2 \times 10^{-20} \text{ J}$
 - $5 \times 10^{-20} \text{ J}$
8. Sebuah elektron yang berada dalam keadaan eksitasi (energi E_2) kembali ke keadaan dasarnya (energi E_1) dengan memancarkan sebuah foton. Panjang gelombang foton yang dipancarkan adalah
- $\frac{hc}{(E_2 - E_1)}$
 - $\frac{hc}{\pi(E_2 - E_1)}$
 - $\frac{(E_2 - E_1)}{hc}$
 - $\frac{\pi(E_2 - E_1)}{hc}$
 - $hc(E_1 - E_2)$

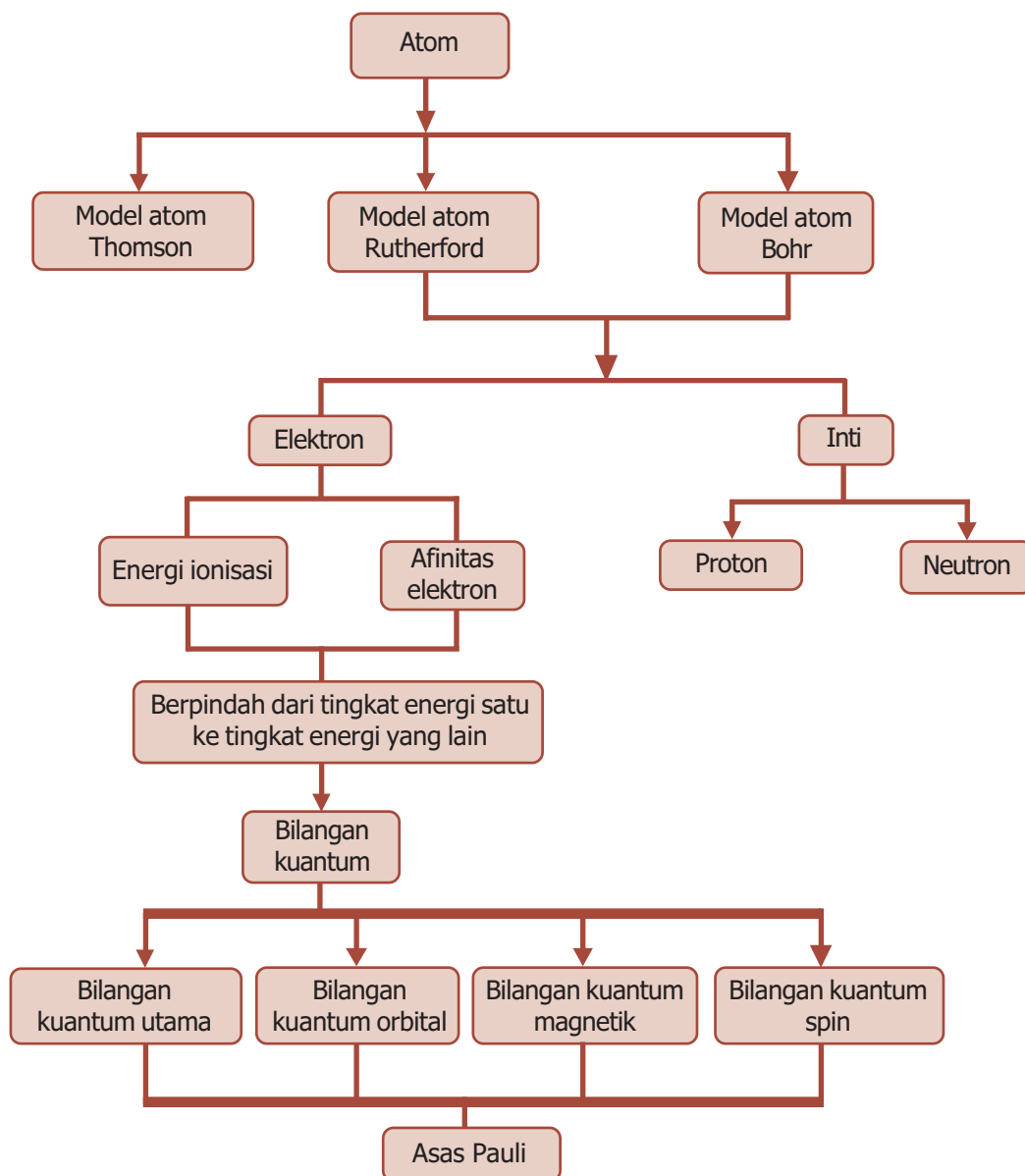
9. Sebuah lampu biru memancarkan cahaya dengan panjang gelombang rata-rata 4.500 \AA . Spesifikasi lampu adalah 150 W dan 80% dari energinya tampil sebagai cahaya yang dipancarkan. Banyak foton yang dipancarkan oleh lampu tiap detik adalah
 - a. $2,2 \times 10^{18}$
 - b. $5,5 \times 10^{18}$
 - c. $2,7 \times 10^{19}$
 - d. $3,3 \times 10^{19}$
 - e. $4,1 \times 10^{20}$
10. Elektron di dalam tabung sinar-X diberi beda potensial 10 kilovolt . Jika sebuah elektron menghasilkan satu foton pada saat elektron tersebut menumbuk target, panjang gelombang minimum yang dihasilkan oleh tabung tersebut adalah
 - a. $0,0124 \text{ nm}$
 - b. $0,124 \text{ nm}$
 - c. $1,24 \text{ nm}$
 - d. $12,4 \text{ nm}$
 - e. 124 nm

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Dua buah lampu pijar memiliki suhu $927 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $1.227 \text{ }^\circ\text{C}$. Jika lampu pijar dianggap berbentuk bola dan jari-jari lampu kedua adalah $0,64$ kali jari-jari lampu pertama, tentukan nilai perbandingan antara daya kalor radiasi lampu pertama dan lampu kedua!
2. Suatu benda hitam pada suhu $27 \text{ }^\circ\text{C}$ memancarkan energi 162 J/s . Jika benda itu dipanasi hingga suhunya menjadi $77 \text{ }^\circ\text{C}$, berapakah laju energi yang dipancarkan benda itu sekarang?
3. Suatu sumber cahaya tertentu meradiasikan kalor dengan puncaknya memiliki frekuensi $1,5 \times 10^{15} \text{ Hz}$. Tentukan suhu sumber cahaya!
4. Tentukan energi foton dari seberkas cahaya yang memiliki panjang gelombang:
 - a. 495 nm ,
 - b. 6.000 \AA !
5. Sebuah radio pengirim beroperasi pada frekuensi 880 Hz dan daya 10 kilowatt . Berapa banyak foton per sekon yang dipancarkan oleh radio tersebut?

PETA KONSEP

Bab 9 Fisika Atom





● Demonstrasi kembang api.

Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Segala sesuatu yang ada di alam terdiri atas materi, yang bentuknya bermacam-macam. Tiap materi tersusun atas unsur dan tiap unsur tersusun atas atom. Atom adalah bagian terkecil dari unsur. Jika diteliti lebih dalam lagi, atom terdiri atas elektron, neutron, dan proton. Perhatikanlah demonstrasi kembang api di atas. Pada saat kembang api dibakar, ratusan juta partikel berhamburan keluar. Dapatkah kalian menghitungnya? Untuk mengetahui konsep atom, ikutilah pembahasan berikut ini.

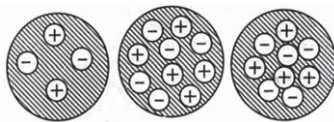
Kata Kunci

atom, bilangan kuantum, elektron, energi ionisasi, model atom, neutron, proton, spektrum

Perkembangan teori atom dimulai ketika seorang filsuf Yunani, Democritus, mengemukakan bahwa setiap materi tersusun oleh partikel-partikel kecil yang tidak dapat dibagi-bagi lagi yang disebut “atom”. Atom berasal dari kata *a* yang berarti “tidak” dan *tomos* yang berarti “terbagi”. Pada tahun 1803, John Dalton (1766 - 1844) melakukan percobaan dan menemukan teori mengenai atom. Teori atom Dalton mengemukakan bahwa atom adalah *bagian terkecil dari suatu zat yang sudah tidak dapat dibagi-bagi lagi*. Pernyataan ini dibantah oleh J.J Thomson, yang melalui percobaan sinar katoda berhasil membuktikan bahwa teori Dalton tersebut salah. Pada bab ini akan dibahas mengenai perkembangan model atom yang dikemukakan ahli-ahli fisika untuk meninjau kelemahan teori Dalton, jadi merupakan penyempurnaan teori atom sebelumnya.



A. Teori Model Atom



Gambar 9.1 Model atom menurut Thomson, seperti roti kismis.

1. Model Atom Thomson

Seperti yang telah diungkapkan bahwa Thomson (1856 - 1940) berhasil membuktikan bahwa teori atom Dalton salah. Melalui percobaannya, ia menemukan bahwa ada bagian dari zat yang lebih kecil dari atom, yaitu elektron. Selanjutnya, pada tahun 1904, Thomson menggambarkan model atom sebagai sebuah bola bermuatan positif dengan elektron tersebar merata ke seluruh isi atom. Model atom Thomson ini dikenal dengan istilah model atom roti kismis.

Thomson menarik kesimpulan bahwa suatu model atom harus memenuhi dua hal berikut ini.

- Sebuah atom harus netral, yaitu jumlah muatan positif (proton) harus sama dengan jumlah muatan negatif (elektron).
- Sebagian besar massa atom terdapat pada muatan positifnya.



Sumber: *Jendela Iptek Materi*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 9.2 Ernest Rutherford menguji model atom Thomson.

2. Model Atom Rutherford

Model atom Thomson akhirnya diuji oleh Ernest Rutherford (1871 - 1937) (Gambar 9.2). Dia melakukan percobaan dengan menembakkan partikel alfa pada lempeng emas yang sangat tipis dengan ukuran 0,01 mm atau kira-kira setebal 2.000 atom. Ternyata, partikel alfa itu tidak seluruhnya menembus secara lurus, artinya beberapa di antaranya terhambur atau dibelokkan membentuk sudut antara 90° sampai 120° .

Apabila model atom Thomson benar, partikel alfa tersebut seharusnya melintas lurus (tidak dibelokkan). Karena massa dan energi partikel alfa jauh lebih besar daripada elektron dan proton dalam atom, sehingga lintasannya tidak terganggu oleh elektron dan proton dalam atom.

Gambar 9.4 memperlihatkan percobaan yang dilakukan oleh Geiger dan Marsden (1911). Berdasarkan percobaan tersebut, Rutherford mengemukakan suatu model atom berikut ini.

- Sebuah atom terdiri atas inti bermuatan positif yang terletak di tengah/pusat.
- Inti atom dikelilingi elektron yang dipengaruhi oleh gaya tarik-menarik, yang disebut gaya Coulomb sebesar:

$$F = k \frac{e^2}{r^2} \dots\dots\dots (9.1)$$

Gaya Coulomb tersebut diimbangi oleh gaya sentripetal sebesar:

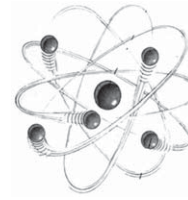
$$F = m \frac{v^2}{r} \dots\dots\dots (9.2)$$

Jadi, elektron berputar pada lintasan tertentu, seperti perputaran planet-planet yang mengelilingi pusat tata surya.

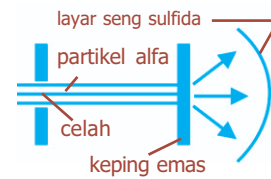
- Atom bersifat netral, yaitu jumlah proton sama dengan jumlah elektron yang mengelilingi inti.

Di sisi lain, model atom Rutherford memiliki kelemahan berikut ini.

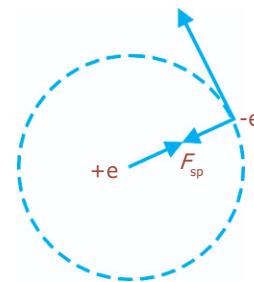
- Elektron yang berputar mengelilingi inti dianggap sebagai getaran listrik yang memancarkan gelombang elektromagnetik (energi). Jika energi berkurang, maka lintasan makin kecil, tetapi elektron tersebut tidak menempel pada inti. Hal ini menunjukkan bahwa model atom Rutherford tidak dapat menjelaskan kestabilan atom.
- Jika lintasan makin kecil, periode putaran elektron juga makin kecil. Frekuensi gelombang bermacam-macam, sehingga spektrum yang dipancarkan seharusnya berupa spektrum diskontinu. Pada kenyataannya, pada atom hidrogen bertentangan dengan pengamatan spektrometer tentang atom hidrogen.



Gambar 9.3 Model atom Rutherford.

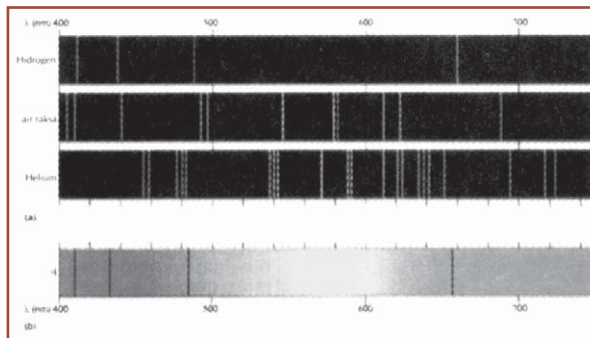


Gambar 9.4 Skema percobaan Geiger dan Marsden.



Gambar 9.5 Gaya Coulomb dan gaya sentrifugal dalam atom hidrogen.

Spektrum Atom Hidrogen



Gambar 9.6 Spektrum gas hidrogen, air raksa, dan helium.

Gas hidrogen ditempatkan dalam sebuah tabung lucutan gas yang diberi beda potensial tinggi sehingga terjadi lucutan muatan listrik. Gas hidrogen menjadi bercahaya dan memancarkan cahaya merah kebiru-biruan. Cahaya ini dapat dianalisis oleh spektrograf. Kita dapat mengamati deretan garis-garis cahaya Pada pelat foto. Setiap garis menampilkan sebuah panjang gelombang cahaya yang diberikan oleh sumber cahaya.

Gambar 9.6 menunjukkan spektrum garis yang diperoleh dalam daerah cahaya tampak. Spektrum garis dalam cahaya tampak terdiri atas empat garis, yaitu 410,2 nm; 434,1 nm; 486,2 nm; dan 656,3 nm.

Pada tahun 1885, J.J Balmer menemukan bahwa panjang gelombang tersebut dapat ditampilkan dalam satu rumus tunggal, yang menyatakan deret garis-garis dalam spektrum radiasi yang dipancarkan oleh atom hidrogen tereksitasi. Garis-garis ini menyatakan lintasan elektron yang jatuh dari tingkat energi lebih tinggi ke lintasan elektron dengan tingkat energi lebih rendah, sambil memancarkan gelombang elektromagnetik sebagai radiasi foton. Deret ini juga disebut sebagai deret yang tepat memancarkan cahaya tampak. Panjang gelombang deret ini dirumuskan:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \dots \dots \dots (9.3)$$

dengan R menyatakan konstanta Rydberg yang besarnya $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ dan $n = 3, 4, 5, 6, \dots$.

Pada Gambar 9.6 memperlihatkan deret Balmer spektrum hidrogen pada beberapa panjang gelombang. Panjang gelombang terpanjang adalah pada 656,3 nm dan panjang gelombang terpendek deret Balmer adalah 364,6 nm.

Deret Balmer bukanlah satu-satunya spektrum garis yang dihasilkan atom-atom hidrogen. Deret yang diperoleh dalam daerah ultra ungu dengan batas panjang gelombang antara 121,6 nm dan 91,2 nm adalah deret Lyman.



Neutron pertama kali ditemukan oleh James Chadwick (1891 - 1974), seorang fisikawan asal Inggris. Karena penemuannya ini, ia dianugerahi hadiah nobel bidang fisika pada tahun 1935.

Adapun yang ditemukan dalam daerah inframerah, adalah Paschen, Bracket, dan Pfund. Secara umum rumus deret dinyatakan sebagai:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ dengan } n > m$$

Untuk deret Lyman, $n = 1$; Balmer $n = 2$; Paschen $n = 3$; Bracket $n = 4$; dan Pfund $n = 5$, sehingga secara umum dapat dituliskan berikut ini.

a. Deret Lyman (deret ultra ungu)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ dengan } n = 2, 3, 4, \dots \quad (9.4)$$

b. Deret Balmer (deret cahaya tampak)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ dengan } n = 3, 4, 5, \dots \quad (9.5)$$

c. Deret Paschen (deret inframerah I)

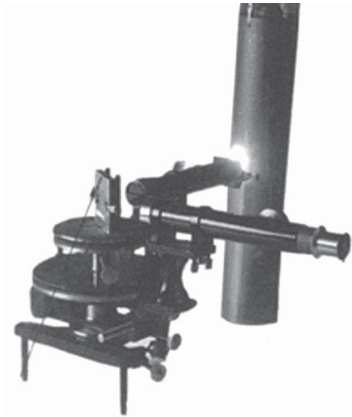
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ dengan } n = 4, 5, 6, \dots \quad (9.6)$$

d. Deret Bracket (deret inframerah II)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ dengan } n = 5, 6, 7, \dots \quad (9.7)$$

e. Deret Pfund (deret inframerah III)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ dengan } n = 6, 7, 8, \dots \quad (9.8)$$



Sumber: *Fakta Sains*, Erlangga, 1997

Gambar 9.7 Spektroskopi untuk mengukur panjang spektrum.

Contoh Soal

1. Tentukan panjang gelombang terpanjang dan terpendek deret Balmer atom hidrogen jika konstanta Rydberg $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$!

Penyelesaian:

Panjang gelombang terpanjang terjadi jika elektron mengalami transisi dari kulit $n = 3$ ke $n = 2$. Sesuai dengan persamaan (9.4) diperoleh:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{5}{36} \right)$$

$$\lambda = 656 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda = 656 \text{ nm}$$

2. Spektrum deret Paschen menghasilkan panjang gelombang $1,28 \times 10^{-6} \text{ m}$. Tentukan nilai n pada deret Paschen tersebut, jika konstanta Rydberg $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$!

Penyelesaian:

Pada deret Paschen berlaku:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda R} = \frac{1}{9} - \frac{1}{n^2}$$

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{9} - \frac{1}{\lambda R}$$

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{9} - \frac{1}{(1,28 \times 10^{-6})(1,097 \times 10^7)}$$

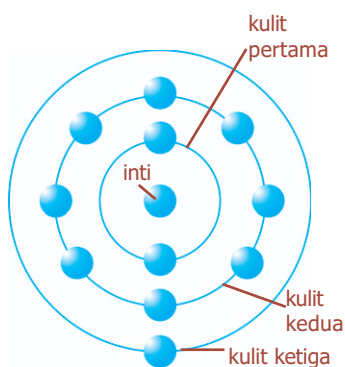
$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{9} - \frac{1}{14,04}$$

$$\frac{1}{n^2} = 0,04$$

$$n^2 = 25 \text{ atau } n = 5$$

Uji Kemampuan 9.1

1. Jika konstanta Rydberg $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, hitung panjang gelombang terpanjang dan terpendek dari deret Paschen!
2. Spektrum deret Lyman menghasilkan panjang gelombang $1,026 \times 10^{-10} \text{ m}$. Jika diketahui $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, tentukan nilai n untuk persamaan Lyman tersebut!
3. Carilah panjang gelombang terpendek untuk garis yang berada dalam deret Lyman!
4. Atom hidrogen berada dalam keadaan aktifnya yang kesepuluh yang sesuai dengan model Bohr ($n = 11$).
 - a. Berapakah jari-jari orbit Bohr-nya?
 - b. Berapakah momentum sudut elektronnya?
 - c. Berapakah energi kinetik elektronnya?
 - d. Berapakah energi potensial elektronnya?
 - e. Berapakah energi menyeluruh elektronnya?



Gambar 9.8 Model atom yang dikemukakan oleh Bohr.

3. Model Atom Bohr

Teori atom Bohr tentang atom dilandasi oleh teori atom Rutherford dan Max Planck. Dalam teori atomnya, Bohr menyatakan bahwa elektron yang mengelilingi inti atom berada pada lintasan atau orbit tertentu yang disebut orbit stabil atau orbit kuantum. Bohr mengaitkan konsep energi dengan gerak elektron dan mendasarkan teorinya pada dua postulat berikut ini.

- a. Elektron mengelilingi inti dengan lintasan atau orbit tertentu. Berdasarkan teori mekanika kuantum,

benda yang bergerak beraturan dengan orbit tertentu tidak akan membebaskan energi jika keliling lintasannya merupakan bilangan bulat dari panjang gelombang de Broglie, dengan momentum angular sebesar:

$$m.v.r = \frac{n.h}{2\pi} \dots\dots\dots (9.9)$$

dengan n adalah bilangan bulat ($n = 1, 2, 3, \dots\dots$) yang menyatakan bilangan kuantum, h adalah tetapan Planck, m adalah massa elektron, dan r adalah jari-jari lintasan.

- b. Elektron dapat berpindah dari tingkat energi satu ke tingkat energi yang lain. Tingkat energi pada tiap lintasan elektron adalah berbeda-beda. Elektron yang paling dekat dengan inti ($n = 1$) mempunyai tingkat energi yang paling rendah.

Jika elektron berpindah ke lintasan yang lebih dekat dari inti (ke tempat energi yang rendah), akan melepaskan (memancarkan) energi foton sebesar hf . Sebaliknya, jika elektron berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi akan menyerap energi.

Bohr beranggapan bahwa suatu elektron tunggal dengan massa m bergerak dalam lintasan orbit berbentuk lingkaran dengan jari-jari r , dan kecepatan v , mengelilingi inti bermuatan positif. Keadaan ini menunjukkan adanya keseimbangan antara gaya Coulomb pada persamaan (9.1) dan gaya sentripetal pada persamaan (9.2).

$$F_C = F_s$$

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

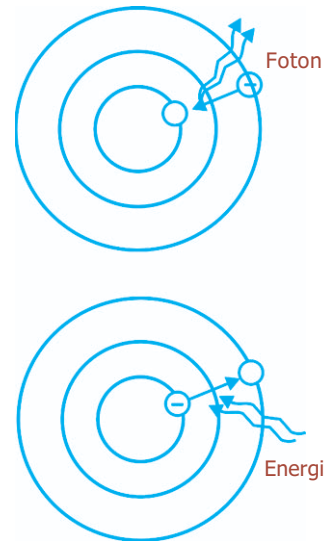
sehingga diperoleh:

$$v^2 = k \frac{e^2}{m.r} \dots\dots\dots (9.10)$$

Dari persamaan (9.9) dan (9.10) akan diperoleh jari-jari lintasan elektron berikut ini.

$$r = \frac{n^2 . h^2}{4 . \pi^2 . e^2 . k . m} \dots\dots\dots (9.11)$$

untuk $n = 1$ diperoleh nilai $r = 5,3 \times 10^{-9} \text{ cm} = 0,53 \text{ \AA}$ yang disebut *jari-jari Bohr* (*Bohr radius*).



Gambar 9.9 Loncatan elektron dari satu orbit ke orbit yang lain.

Komet

Kolom mengingat

Inti atom terdiri atas proton dan neutron. Inti membentuk sebagian besar massa atom. Elektron bergerak dalam orbit tetap di sekeliling inti. Hal ini disebabkan oleh daya tarik listrik antara muatan negatif elektron-elektron dan muatan positif proton-proton dalam inti. Neutron membantu memegang inti. Tanpa neutron, proton-proton yang bermuatan positif akan saling menolak satu sama lain.

Energi tiap lintasan elektron merupakan jumlah dari energi kinetik dan energi potensialnya.

$$E = E_p + E_k$$

$$= -k \frac{e^2}{r} + \frac{1}{2} mv^2$$

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \dots\dots\dots (9.12)$$

Berdasarkan nilai r pada persamaan (9.11) maka energi elektron pada persamaan (9.12) menjadi:

$$E_n = \frac{-m \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2 \cdot n^2} \dots\dots\dots (9.13)$$

dengan:

$$\frac{m \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} = \frac{(9 \times 10^{31} \text{ kg})(1,602 \times 10^{-19} \text{ C})^4}{8(8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2)^2 (6,62 \times 10^{-34} \text{ Js})^2}$$

$$= 2,17 \times 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV}$$

sehingga diperoleh:

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2} \text{ eV} \dots\dots\dots (9.14)$$

dengan n adalah tingkat energi.

Model atom Bohr juga memiliki kelemahan-kelemahan berikut ini.

- Lintasan elektron ternyata rumit sekali, masih terdapat beberapa suborbit yang tidak dapat dijelaskan dengan teori Bohr.
- Teori atom Bohr dapat menerangkan model atom hidrogen, tetapi tidak dapat menerangkan atom berelektron banyak karena sulit perhitungannya.
- Tidak dapat menerangkan proses ikatan kimia.
- Tidak dapat menerangkan pengaruh medan magnet terhadap spektrum atom.



B. Tingkat Energi

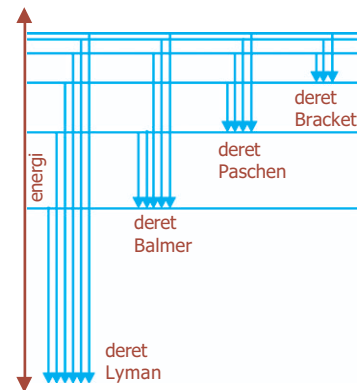
Tingkat energi menjelaskan mengenai energi tetap tertentu yang dapat dimiliki suatu sistem yang dijelaskan oleh mekanika kuantum, seperti yang dapat dimiliki oleh molekul, atom, elektron, atau inti. Misalnya, sebuah atom memiliki energi tetap sesuai dengan orbital tempat elektron bergerak mengelilingi inti atom. Atom ini dapat menerima suatu kuantum energi sehingga menjadi sebuah atom tereksitasi.

Eksitasi menunjukkan suatu proses yang terjadi ketika sebuah inti, elektron, atom, ion, atau molekul memperoleh energi yang memindahkannya ke suatu keadaan kuantum (keadaan tereksitasi) yang lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Antara keadaan dasar (*ground state*), yaitu energi terendah yang mungkin untuk suatu sistem tertentu, dan keadaan tereksitasi pertama tidak ditemukan tingkat energi yang terijinkan (daerah terlarang).

Beberapa energi yang dilepas atau diserap elektron ketika berpindah dari tingkat n_A ke tingkat n_B dapat ditentukan dengan persamaan (9.14) yaitu:

$$\Delta E = En_B - En_A$$

$$\Delta E = -13,6 \left(\frac{1}{n_B^2} - \frac{1}{n_A^2} \right) \dots\dots\dots (9.15)$$



Gambar 9.10 Diagram tingkat energi elektron atom hidrogen.

Contoh Soal

1. Elektron atom hidrogen berada pada orbit Bohr $n = 2$. Jika $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, dengan $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, tentukan:
 - a. jari-jari orbit,
 - b. gaya elektrostatik yang bekerja pada elektron,
 - c. kelajuan elektron!

Penyelesaian:

- a. Jari-jari orbit (r_n)

$$r_n = 0,53 \cdot n^2 = (0,53)(2^2) = 2,12 \text{ \AA}$$

- b. Gaya elektrostatik yang bekerja pada elektron (F_c)

$$F_c = \frac{k \cdot e^2}{r_n^2} = \frac{(9 \times 10^9)(1,6 \times 10^{-19})^2}{(2,12 \times 10^{-10})^2} = 5,13 \times 10^{-9} \text{ N}$$

- c. Kelajuan elektron (v)

$$F_s = F_c$$

$$\frac{m_e \cdot v^2}{r} = F_c$$

$$v = \sqrt{\frac{F_c \cdot r}{m_e}} = \sqrt{\frac{(5,13 \times 10^{-9})(2,12 \times 10^{-10})}{(9,1 \times 10^{-31})}} = \sqrt{1,195 \times 10^{12}}$$

$$v = 1,093 \times 10^6 \text{ m/s}$$

2. Sebuah elektron berpindah lintasan dari $n = 2$ ke $n = 1$ dengan memancarkan energi. Tentukan:
 - a. energi foton yang dipancarkan,
 - b. frekuensi foton,
 - c. panjang gelombang foton!

Penyelesaian:

- a. Energi foton yang dipancarkan

$$\Delta E = -13,6 \left(\frac{1}{n_B^2} - \frac{1}{n_A^2} \right) = -13,6 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = -10,2 \text{ eV}$$

$$\Delta E = -1,632 \times 10^{-18} \text{ joule (tanda (-) menyatakan pemancaran energi)}$$

- b. Frekuensi foton (f)

$$\Delta E = h \cdot f$$

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

$$= \frac{1,632 \times 10^{-18}}{6,62 \times 10^{-34}}$$

$$= 2,47 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

- c. Panjang gelombang foton

$$c = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2,47 \times 10^{15}}$$

$$\lambda = 1,215 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Uji Kemampuan 9.2

- Sebuah atom hidrogen pada orbit Bohr $n = 3$. Jika $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, dan $r_0 = 0,528 \text{ \AA}$, tentukan:
 - jari-jari orbit,
 - gaya elektrostatik yang bekerja pada elektron,
 - gaya sentripetal pada elektron, dan
 - kelajuan elektron!
- Sebuah elektron mengalami transisi dari $n = 4$ deret Balmer spektrum atom hidrogen. Jika $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, dan $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Js}$, tentukan:
 - panjang gelombang,
 - frekuensi,
 - energi foton yang dipancarkan pada transisi tersebut!
- Dengan menggunakan persamaan deret Lyman, berapa joule energi foton yang dipancarkan atom hidrogen saat terjadi transisi elektron dari tingkat tak berhingga?



C. Bilangan Kuantum

Struktur elektrolit suatu atom mengacu pada cara elektron tersusun di sekeliling inti, dan terutama pada tingkat energi tertentu yang ditempati atom tersebut. Suatu bilangan yang menunjukkan orbit elektron mengelilingi inti pada kulit atau tingkat energi tertentu disebut *bilangan kuantum* (*quantum number*). Setiap elektron dapat digolongkan berdasarkan empat bilangan kuantum yang akan diuraikan berikut ini.

1. Bilangan Kuantum Utama (n)

Bilangan ini menyatakan tingkat energi utama dan memiliki nilai 1, 2, 3 dan seterusnya. Semakin besar nilai n , maka semakin jauh letak elektron dari inti. Tingkat energi ataupun orbit yang sesuai dengan tingkat energi tersebut dinyatakan sebagai kulit dan dinyatakan dengan huruf K, L, M, N, \dots . Kulit K ($n = 1$) adalah kulit yang letaknya paling dekat dengan inti. Jumlah elektron dalam kulit adalah $2n^2$.

2. Bilangan Kuantum Orbital atau Azimuth

Bilangan ini menentukan nilai momentum sudut suatu elektron, dan menunjukkan di subkulit (sublintasan) tempat pergerakan elektron terjadi. Nilai l tergantung pada nilai bilangan kuantum utama n . Untuk nilai n tertentu, l mempunyai nilai bilangan bulat yang mungkin dari 0 sampai $(n-1)$. Bila $n = 1$, hanya ada satu nilai l yang mungkin, yaitu $l = n - 1 = 1 - 1 = 0$. Bila $n = 2$ ada dua nilai l , 0 dan 1. Bila $n = 3$, ada tiga nilai l , yaitu 0, 1, 2. Subkulit $l = 0$ disebut subkulit s (sharp), subkulit $l = 1$ adalah p (principle), subkulit $l = 2$ disebut d (diffuse), dan subkulit $l = 3$ disebut f (fundamental). Jadi, bila $l = 0$, kita mempunyai sebuah orbital s , bila $l = 1$ kita mempunyai orbital p , dan seterusnya.

Sekumpulan orbital-orbital dengan nilai n yang sama seringkali disebut *kulit*. Satu atau lebih orbital dengan nilai n dan l yang sama dirujuk selalu subkulit. Misalnya, kulit dengan $n = 2$ terdiri atas 2 subkulit, $l = 0$ dan 1. Subkulit-subkulit ini disebut subkulit $2s$ dan subkulit $2p$ di mana 2 melambangkan nilai n , serta s dan p melambangkan nilai l .



Gambar 9.11 Satu elektron memungkinkan gerak putar ke kanan $\frac{1}{2}$ dan ke kiri $\frac{1}{2}$.

Komet
Kolom mengingat

Angka "2" dalam $2s$ merujuk pada nilai n dan huruf "s" melambangkan nilai l .

Pieter Zeeman adalah ahli fisika dari Belanda yang menemukan efek Zeeman. Karya tulisnya antara lain *Menting en Over Het Verschijnsel van Kerr bij Polire Terugkaat Sing op Ijzer, Kobal en Nikkel*.

Besar momentum sudut elektron dinyatakan:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \dots\dots\dots (9.16)$$

dengan $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \times 10^{-34} \text{ Js}$

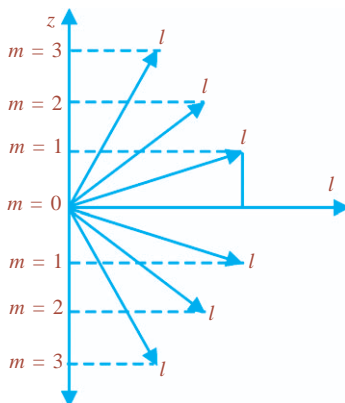
Efek Zeeman

Bilangan kuantum orbital muncul karena teramatinya **efek Zeeman**. Pieter Zeeman (1865 - 1943) pada tahun 1896 mengamati suatu gejala terpisahnya garis-garis dalam suatu spektrum bila sumber spektrum dipaparkan pada medan magnet. Garis spektrum cahaya terjadi bila elektron-elektron dalam atom berubah dari tingkat energi yang satu ke tingkat energi yang lain. Pada efek Zeeman normal, satu garis tunggal pecah menjadi tiga garis bila arah medan tegak lurus lintasan cahaya, atau pecah menjadi dua garis bila arah medan sejajar lintasan cahaya. Gejala ini dapat diterangkan dengan prinsip elektromagnetik klasik, yaitu gerakan elektron orbital di dalam sumber yang menjadi semakin cepat atau semakin lambat akibat pengaruh medan yang bekerja.

3. Bilangan Kuantum Magnetik

Bilangan kuantum ini menentukan orientasi dari orbit elektron dalam medan magnet. Nilai m_l yang mungkin yaitu $-l, -(l-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (l-1), +l$. Di subkulit s (yaitu bila $l = 0$) nilai $m_l = 0$. Di subkulit p (yaitu bila $l = 1$) nilai m_l yang mungkin adalah $+1, 0$, dan -1 , jadi ada tiga orbital p pada subkulit p , yang biasanya dibedakan dengan p_x, p_y , dan p_z . Dalam keadaan normal, ketiga orbital ini memiliki tingkat energi yang sama. Dalam setiap nilai bilangan kuantum orbital (l) memiliki nilai bilangan kuantum magnetik (m_l) sebanyak $(2l+1)$.

Bilangan kuantum magnetik (m_l) merupakan proyeksi vektor \vec{l} pada suatu sumbu z sembarang seperti yang dijelaskan oleh Gambar 9.12. Elektron dalam suatu atom dengan momentum sudut tertentu dapat berinteraksi dengan medan magnetik luar. Bila arah medan magnetik luar adalah sejajar dengan sumbu z , maka nilai L dalam arah z memenuhi persamaan:



Gambar 9.12 m sebagai proyeksi l pada sumbu z .

$$L_z = m_l \cdot \hbar \dots\dots\dots (9.17)$$

Contoh Soal

Jika bilangan kuantum orbital $l = 3$, tentukanlah:

- besar momentum sudut elektron yang mungkin,
- momentum sudut elektron dalam arah sumbu z !

Penyelesaian:

Bilangan kuantum magnetik m_l yang mungkin untuk $l = 3$

$$m_l = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$$

- Besar momentum sudut elektron untuk $l = 3$

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar = \sqrt{3(3+1)} \hbar = \sqrt{12} \hbar = 2\sqrt{3} \hbar \text{ Js}$$

- Momentum sudut elektron dalam arah sumbu z untuk:

$$m_l = -3 \rightarrow L_z = (-3) \hbar = -3 \hbar$$

$$m_l = -2 \rightarrow L_z = (-2) \hbar = -2 \hbar$$

$$m_l = -1 \rightarrow L_z = (-1) \hbar = -\hbar$$

$$m_l = 0 \rightarrow L_z = (-0) \hbar = 0$$

$$m_l = 1 \rightarrow L_z = (1) \hbar = \hbar$$

$$m_l = 2 \rightarrow L_z = (2) \hbar = 2 \hbar$$

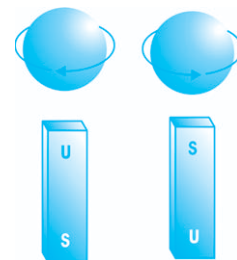
$$m_l = 3 \rightarrow L_z = (3) \hbar = 3 \hbar$$

Uji Kemampuan 9.3

- Berapakah bilangan-bilangan kuantum untuk elektron-elektron dalam atom lithium ($Z = 3$), jika atom tersebut berada dalam keadaan dasarnya?
- Berikan nilai-nilai bilangan kuantum utama (n), bilangan kuantum orbital (l), dan bilangan kuantum magnetik m_l untuk orbital-orbital pada subkulit 4d!
- Berapa jumlah total orbital yang berkaitan dengan bilangan kuantum utama $n = 4$?

4. Bilangan Kuantum Spin (m_s)

Bilangan kuantum ini memberikan gambaran tentang arah putaran elektron pada sumbunya sendiri. Nilai bilangan kuantum spin yang mungkin adalah $+\frac{1}{2}$ atau $-\frac{1}{2}$ (kemungkinan putar kanan = $\frac{1}{2}$ dan kemungkinan putar kiri = $-\frac{1}{2}$). Gambar 9.13 menunjukkan dua kemungkinan gerak spin elektron, yang satu searah jarum jam dan satunya berlawanan dengan arah jarum jam.



Gambar 9.13 Spin elektron (a) searah jarum jam (b) berlawanan dengan arah jarum jam.

Contoh Soal

Berapa jumlah maksimum elektron yang mungkin terdapat pada tingkat utama di mana $n = 3$?

Penyelesaian:

Untuk $n = 3$, maka $l = 0, 1$, dan 2 . Jumlah orbital untuk tiap nilai l adalah:

Nilai l	Jumlah Orbital ($2l + 1$)
0	1
1	3
2	5

Jumlah orbital adalah 9, jumlah maksimum elektron yang dapat berada pada orbital-orbital ini adalah $2n^2 = 2(3)^2 = 18$.

Uji Kemampuan 9.4

Elektron-elektron dalam sebuah atom yang memiliki nilai yang sama untuk l tetapi nilai-nilai yang berbeda untuk m_l dan m_s dikatakan berada dalam subkulit yang sama. Berapa banyak elektron yang ada dalam subkulit $l = 3$?



D. Asas Pauli

Pada konfigurasi elektron He, $1s^2$ dibaca “1 s dua” bukan “1 s kuadrat”.

Prinsip larangan Pauli dikemukakan pada tahun 1925 oleh Wolfgang Pauli (1900 - 1958), yang menyatakan bahwa tidak mungkin ada dua elektron yang mempunyai empat bilangan kuantum sama. Dalam hal ini, dua buah elektron dapat mempunyai bilangan kuantum n , l , dan m yang sama, tetapi bilangan kuantum s tidak mungkin sama sebab yang mungkin $\frac{1}{2}$ atau $-\frac{1}{2}$. Sehingga, setiap orbital dapat diisi oleh maksimal dua elektron (sepasang elektron).

Asas Pauli menentukan banyaknya elektron pada masing-masing kulit dan subkulit. Misalnya, untuk $n = 2$, kemungkinan nilai l ada dua, yaitu $l = 0$ dan $l = 1$. Dengan $l = 0$, hanya ada satu kemungkinan nilai m yaitu $m = 0$ yang memiliki dua kemungkinan nilai s yaitu $s = +\frac{1}{2}$ dan $s = -\frac{1}{2}$. Dengan demikian, kulit L di subkulit s hanya ada dua elektron saja. Di subkulit p , yaitu dengan $l = 1$, ada tiga kemungkinan nilai m , yaitu $m = -1$, $m = 0$,

dan $m = 1$, yang masing-masing mempunyai dua kemungkinan nilai s . Jadi, di subkulit p terdapat 6 elektron, sehingga di kulit L itu terdapat 8 elektron. Pada umumnya, subkulit p di kulit $n = 2$, ditulis sebagai $2p$, dan seterusnya. Tabel 9.1 menunjukkan konfigurasi elektron-elektron atom pada beberapa unsur.

Tabel 9.1 Konfigurasi elektron-elektron atom pada beberapa unsur

Atom	Banyak elektron	Konfigurasi Elektron
Hidrogen (H)	1	$1s^1$
Helium (He)	2	$1s^2$
Litium (Li)	3	$1s^2 2s^1$
Berilium (Be)	4	$1s^2 2s^2$
Boron (B)	5	$1s^2 2s^2 2p^1$
Karbon (C)	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
Nitrogen (N)	7	$1s^2 2s^2 2p^3$
Oksigen (O)	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
Fluorin (F)	9	$1s^2 2s^2 2p^5$
Neon (Ne)	10	$1s^2 2s^2 2p^6$
Natrium (Na)	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Magnesium (Mg)	12	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
Aluminium (Al)	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Silikon (Si)	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Fosfor (P)	15	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
Sulfur (S)	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Klorin (Cl)	17	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
Argon (Ar)	18	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
Kalium (K)	19	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^1$
Kalsium (Ca)	20	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2$



E. Energi Ionisasi dan Afinitas Elektron

Sifat-sifat kimia setiap atom ditentukan oleh konfigurasi elektron valensi atom tersebut. Kestabilan elektron terluar ini tercermin secara langsung pada energi ionisasi atom tersebut. Energi ionisasi ini adalah energi minimum yang diperlukan untuk memindahkan atau melepaskan satu elektron atom pada keadaan dasarnya. Bentuk ikatan kimia berasal dari pemindahan elektron-elektron, sehingga energi yang dibutuhkan untuk memindahkan elektron adalah ukuran yang sangat penting dalam pembentukan sebuah ikatan atom.

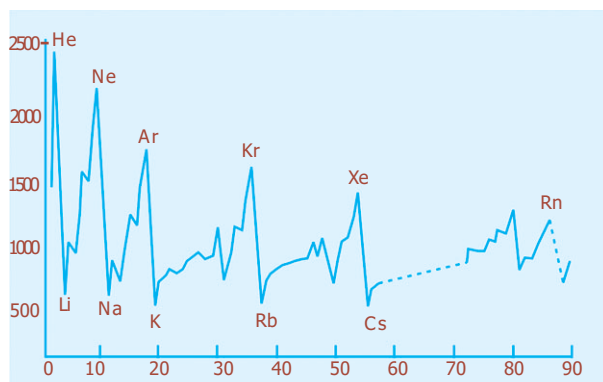


Peningkatan energi ionisasi pertama dari kiri ke kanan dalam satu periode dan dari bawah ke atas dalam satu golongan untuk unsur-unsur golongan utama.

Afinitas elektron bernilai positif jika reaksinya isotermik dan bernilai negatif jika reaksinya endotermik.

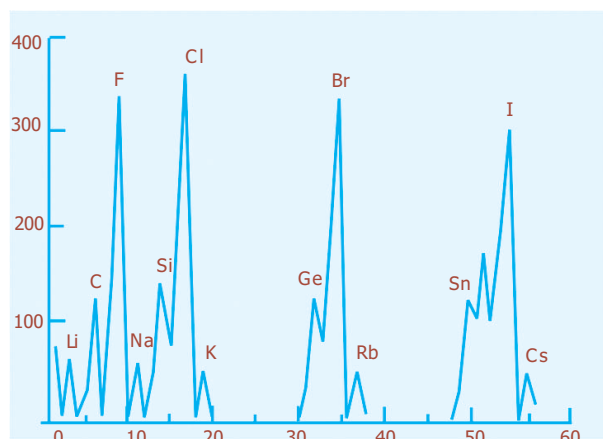
Besarnya energi ionisasi merupakan ukuran usaha yang diperlukan untuk memaksa satu atom untuk melepaskan elektronnya, atau seberapa erat elektron terikat dalam atom. Makin besar energi ionisasi, makin sukar untuk melepaskan elektronnya.

Pada tabel periodik unsur, berbagai macam radiasi atom yang memiliki atom kecil secara khas memiliki energi ionisasi yang tinggi, dan atom yang besar memiliki energi ionisasi yang kecil. Dengan demikian, elemen dengan energi ionisasi terendah ditemukan di tabel kiri periode yang lebih rendah, dan energi ionisasi tertinggi ditemukan di tabel sebelah kanan atas. Variasi dari energi ionisasi berhubungan dengan variasi radius atom, karena valensi elektron dalam atom yang besar rata-rata jauh dari inti, maka daya tariknya sangat lemah. Sebaliknya, valensi elektron dalam atom yang kecil dekat dengan sumber inti, maka daya tariknya kuat.



Gambar 9.14 Keragaman energi ionisasi pertama terhadap nomor atom.

Gambar 9.14 menunjukkan keperiodikan dalam kestabilan elektron yang terlihat paling lemah. Satu keistimewaan yang terlihat pada Gambar 9.14 adalah puncak-puncak yang berkaitan dengan gas mulia. Energi ionisasi yang sangat tinggi bersesuaian dengan fakta bahwa hampir semua gas mulia tidak reaktif secara kimia. Pada kenyataannya, helium mempunyai energi ionisasi pertama tersebar di antara semua unsur.



Gambar 9.15 Plot afinitas elektron terhadap nomor atom untuk 56 unsur pertama.

Sifat lain yang memengaruhi pembentukan ikatan adalah kemampuannya untuk menerima satu atau lebih elektron. Kemampuan ini disebut **afinitas elektron**. Afinitas elektron positif berarti bahwa energi dilepaskan ketika satu elektron ditambahkan ke suatu atom, dan negatif ketika satu elektron diterima oleh atom suatu unsur. Afinitas yang bernilai besar dan positif berarti bahwa ion negatifnya sangat stabil, yaitu atom tersebut memiliki kecenderungan kuat untuk menerima elektron, seperti energi ionisasi suatu atom yang tinggi yang berarti bahwa atom itu sangat stabil.

Uji Kemampuan 9.5

Energi ionisasi biasanya meningkat dari kiri ke kanan dalam satu periode. Tetapi, mengapa aluminium mempunyai energi ionisasi lebih rendah dibandingkan magnesium?

Kegiatan

Tujuan : Memahami perkembangan teori atom.

Teori atom Dalton menyatakan bahwa atom adalah partikel terkecil suatu materi yang tidak dapat dibagi lagi. Beberapa ilmuwan melakukan percobaan lebih lanjut untuk menunjukkan bahwa atom bukanlah sesuatu yang tidak terbagi, melainkan terdiri atas beberapa jenis partikel subatom. Dalam atom terdapat partikel dasar, yaitu elektron, proton, dan neutron. Tugas kalian adalah mencari artikel dari beberapa literatur berupa artikel, hasil telaah atau yang lainnya, kemudian pelajari, dan buatlah laporan tertulis yang berisi rangkuman yang membahas struktur atom menurut beberapa ilmuwan, yang menyatakan bahwa proton dan neutron terdapat dalam inti atom, sedangkan elektron berputar mengelilingi inti. Presentasikan laporan kalian di depan kelas!

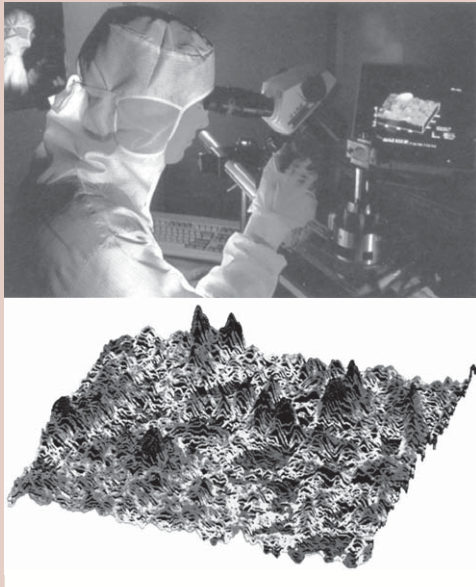
Percikan Fisika

Melihat Baru Percaya

Gelombang cahaya terlalu besar bila dibandingkan dengan ukuran atom. Oleh karena itu, mikroskop optik biasa tidak mampu melihat sebuah atom. Yang tampak hanyalah gambar kabur jutaan atom bersama-sama.

Mikroskop gaya atom atau AFM (*atomic force microscope*) tidak menggunakan cahaya. Yang digunakannya adalah sebuah alat perunut tajam yang dapat digerakkan maju dan mundur pada permukaan sebuah sampel, merunut awan elektron di seputar setiap atom. Hasilnya, gambar atom-atom dapat ditampilkan melalui sebuah monitor komputer.

Gambar di samping adalah gambar AFM yang dibuat komputer pada permukaan sepotong kaca. Setiap wilayah yang naik merupakan satu atom silikon atau oksigen.



Fiesta

Fisikawan Kita



Niels Bohr (1885 - 1962)

Ahli fisika berkebangsaan Denmark. Ia lahir pada tanggal 7 Oktober 1885 dan meninggal pada tanggal 18 November 1962. Dengan menggunakan model atom Rutherford serta teori kuantum Max Planck dan Einstein, ia menyusun teori atom yang dapat menjelaskan tentang spektrum cahaya yang dipancarkan atom hidrogen.

Niels Bohr memperoleh gelar doktor bidang fisika pada umur 26 tahun. Tesisnya mengenai teori elektron untuk logam. Kemudian, ia bergabung dengan Rutherford menyelidiki struktur atom. Dua tahun berikutnya, ia mengemukakan teori atomnya, walaupun kemudian ternyata mempunyai banyak kelemahan. Bohr mendapat hadiah Nobel pada tahun 1922. Ia juga memberikan sumbangan pada fisika inti atom dengan mengemukakan model tetes cair yang dapat menjelaskan peristiwa fisi nuklir.

Kilas Balik

✳ Rumus umum untuk setiap deret dinyatakan:

a. Deret Lyman (deret ultra ungu)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ dengan } n = 2, 3, 4, \dots$$

b. Deret Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ dengan } n = 3, 4, 5, \dots$$

c. Deret Paschen

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ dengan } n = 4, 5, 6, \dots$$

d. Deret Bracket

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ dengan } n = 5, 6, 7, \dots$$

e. Deret Pfund

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ dengan } n = 6, 7, 8, \dots$$

✳ Jari-jari orbit ke- n dinyatakan sebagai:

$$r_n = 0,53 \cdot n^2$$

- * Energi total elektron terkuantisasi di mana energi elektron pada orbit ke- n untuk atom hidrogen adalah:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

- * Bilangan kuantum utama (n) menentukan tingkat energi utama, yang memiliki nilai 1, 2, 3, dan seterusnya.
- * Bilangan kuantum orbital (l) menentukan besar momentum sudut elektron. Besar momentum sudut elektron (L) dinyatakan dengan:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \text{ dengan } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

- * Bilangan kuantum magnetik (m_l) menentukan arah dari momentum sudut elektron. Bila dipilih arah medan magnetik sejajar sumbu z , maka nilai L dalam arah sumbu z adalah:

$$L_z = m_l \cdot \hbar$$

- * Bilangan kuantum spin (m_s) menentukan arah perputaran elektron terhadap sumbunya dan hanya memiliki nilai $+\frac{1}{2}$ dan $-\frac{1}{2}$.
- * Energi ionisasi merupakan ukuran kestabilan konfigurasi elektron terluar suatu atom.
- * Afinitas elektron adalah energi yang dibebaskan pada saat suatu atom menangkap sebuah elektron.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

- Pernyataan berikut ini yang merupakan teori atom menurut Dalton adalah
 - bagian terkecil dari suatu atom adalah elektron
 - sebagian besar massa atom terkumpul pada intinya
 - elektron dari suatu unsur sama dengan elektron dari unsur lain
 - atom dari unsur-unsur yang sama mempunyai sifat yang juga sama
 - elektron pada suatu unsur tidak dapat bergabung dengan atom unsur lain
- Pernyataan yang *tidak* berhubungan dengan model atom Thomson adalah
 - muatan positif tersebar merata dalam inti atom
 - atom bukan bagian terkecil dari suatu unsur
 - elektron adalah bagian dari atom yang bermuatan negatif
 - elektron memiliki massa yang sama dengan massa muatan positif
 - elektron pada atom tersebar merata di antara muatan positif

3. Dua hal yang merupakan kelemahan model atom Rutherford adalah
 - a. model atom Rutherford hanya terbatas berlakunya dan bertentangan dengan model atom Bohr
 - b. elektron yang mengelilingi inti akan memancarkan energi dan elektron tidak memiliki orbit stasioner
 - c. elektron bergerak mengelilingi inti dan massa atom terpusat pada intinya
 - d. atom-atom menjadi tidak stabil dan bertentangan dengan hasil pengamatan tentang spektrum atom hidrogen yang bersifat diskret
 - e. tidak menjelaskan adanya tingkatan energi atom dan atom-atom menjadi tidak stabil
4. Menurut model atom Bohr, elektron bergerak mengelilingi inti hanya pada lintasan tertentu. Besarnya momentum angular pada lintasan itu adalah
 - a. berbanding lurus dengan tetapan Rydberg
 - b. berbanding lurus dengan tetapan Planck
 - c. berbanding terbalik dengan tetapan Planck
 - d. berbanding terbalik dengan momentum linier
 - e. berbanding terbalik dengan tetapan Rydberg
5. Energi ionisasi sebuah atom adalah
 - a. energi minimum yang diperlukan untuk menambahkan sebuah elektron pada atom
 - b. energi yang diperlukan untuk memindahkan semua elektron terluar ke tak berhingga
 - c. energi minimum yang diperlukan untuk memindahkan sebuah elektron ke tak berhingga
 - d. energi yang diperlukan untuk memindahkan semua elektron atom ke tak berhingga
 - e. energi yang diperlukan untuk memindahkan semua elektron pada kulit terdalam ke tak berhingga
6. Bila elektron berpindah dari kulit N ke kulit K pada atom hidrogen dan R adalah konstanta Rydberg, maka panjang gelombang yang terjadi adalah

a. $\frac{8}{9} R$	d. $\frac{9}{17} R$
b. $\frac{9}{8} R$	e. $\frac{16}{15} R$
c. $\frac{17}{9} R$	
7. Elektron atom hidrogen berpindah dari lintasan $n = 3$ ke $n = 1$. Apabila $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, maka panjang gelombang foton yang diradiasikan oleh atom tersebut adalah

a. 1.026 \AA	d. 2.115 \AA
b. 1.097 \AA	e. 6.541 \AA
c. 1.215 \AA	

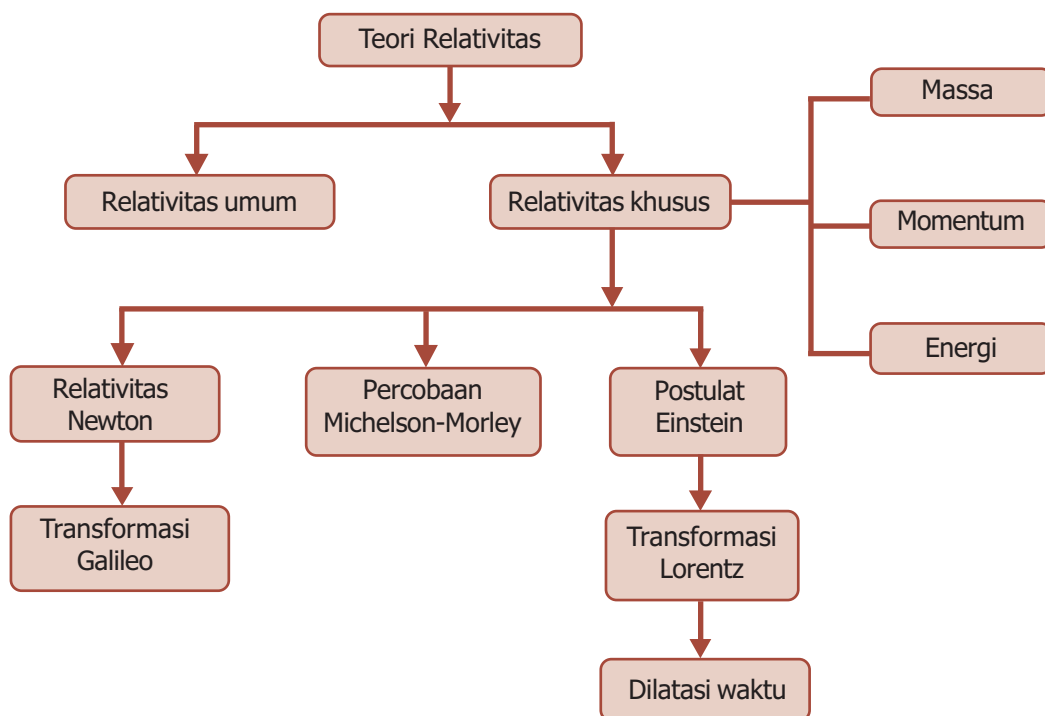
8. Menurut model atom Bohr, besar momentum anguler sebuah elektron atom hidrogen yang mengelilingi inti pada bilangan kuantum n adalah
- $\frac{nh}{2\pi}$
 - $\frac{2\pi}{nh}$
 - nh
 - nhf
 - $\frac{1}{nhf}$
9. Untuk bilangan kuantum orbital $l = 2$, maka nilai bilangan kuantum magnetik m_l yang mungkin adalah
- 0
 - 1, 0, +1
 - 2, 0, +2
 - 2, -1, 0, +1, +2
 - 3, 0, +3
10. Afinitas elektron adalah
- energi yang dibebaskan pada saat pembentukan ion negatif
 - energi yang dibebaskan pada saat pembentukan ion positif
 - energi yang diserap pada saat pembentukan ion negatif
 - energi yang diserap pada saat pembentukan ion positif
 - sama dengan energi ionisasi

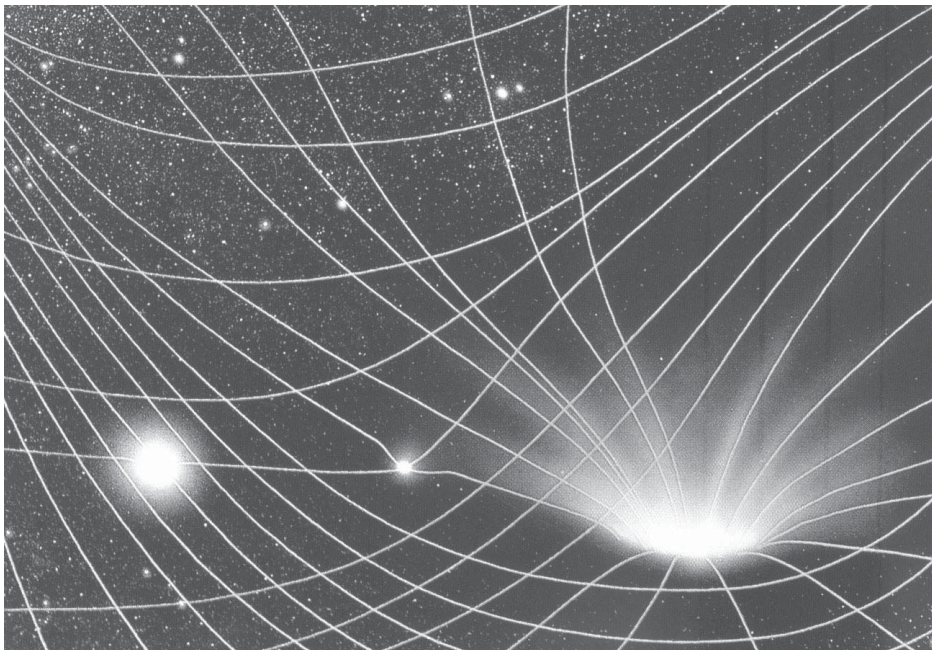
B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Garis-garis spektrum Paschen dihasilkan bila dalam atom hidrogen terjadi perpindahan elektron dari tingkat yang lebih tinggi ke tingkat $n = 3$. Tentukan dua panjang gelombang terbesar dalam deret Paschen!
- Untuk atom hidrogen pada orbit Bohr $n = 3$, tentukan:
 - jari-jari elektron,
 - gaya listrik yang bekerja pada elektron,
 - kelajuan elektron!
- Tentukan bilangan kuantum utama dari orbit-orbit berikut!
 - Orbit elektron pada atom hidrogen dengan energi -0,544 eV.
 - Orbit elektron pada ion He^+ dengan energi -3,4 eV.
 - Orbit elektron pada ion Li^{2+} dengan energi -4,90 eV.
- Hitunglah jumlah elektron yang dapat menempati setiap subkulit berikut!
 - $2s$
 - $3d$
 - $5f$
 - $4p$
- Sebuah elektron berada pada keadaan $4d$.
 - Berapakah bilangan kuantum utamanya?
 - Berapakah bilangan kuantum orbitalnya?
 - Berapakah besar momentum sudut elektronnya?

PETA KONSEP

Bab 10 Relativitas Khusus





- Teori relativitas menjelaskan gravitasi sebagai hasil distorsi ruang.

Sumber: *Ensiklopedia Iptek*, PT Lentera Abadi, 2005

Coba kalian perhatikan gambar di atas. Lekukan di bidang jala menggambarkan gravitasi sebagai hasil distorsi ruang di sekitarnya. Matahari, yang terlihat pada bagian kiri, walaupun jauh lebih berat dibanding Bumi, hanya mampu menciptakan lekuk kecil jika dibanding bintang neutron (tengah) yang berukuran lebih kecil tapi mempunyai massa yang lebih besar. Apalagi jika dibandingkan dengan lubang hitam pada kanan gambar yang mempunyai massa luar biasa besar. Fenomena tersebut dapat dijelaskan oleh teori relativitas yang dinyatakan oleh Albert Einstein.

Kata Kunci

kerangka acuan,
relativitas umum,
relativitas khusus,
transformasi Lorentz

Relativitas merupakan salah satu dari beberapa teori mengenai gerak, yang dirancang untuk menjelaskan penyimpangan dari mekanika Newton yang timbul akibat gerak relatif yang sangat cepat. Teori ini telah mengubah pandangan kita mengenai ruang, waktu, massa, energi, gerak, dan gravitasi. Teori ini terdiri atas teori khusus dan teori umum, yang keduanya bertumpu pada dasar matematika yang kuat dan keduanya telah diuji dengan percobaan-percobaan dan pengamatan.

Teori khusus, yang dikembangkan oleh Einstein pada tahun 1905, berkenaan dengan perbandingan pengukuran yang dilakukan dalam kerangka acuan inersia berbeda yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif satu sama lain. Di lain pihak, teori umum, yang dikemukakan tahun 1915, berkenaan dengan kerangka acuan dan gravitasi yang dipercepat. Pada bab ini pembahasan akan lebih terfokus pada teori relativitas khusus.



A. Relativitas Newton



Gambar 10.1 Teori relativitas dikembangkan oleh Albert Einstein.

Teori relativitas muncul dari kebutuhan terhadap kerangka acuan, yaitu suatu patokan yang dapat digunakan ilmuwan untuk menganalisis hukum gerak. Pada waktu kelas X, kalian telah mempelajari Hukum Newton tentang gerak, di mana Hukum I Newton tidak membedakan antara partikel yang diam dan partikel yang bergerak dengan kecepatan konstan. Jika tidak ada gaya luar yang bekerja, partikel tersebut akan tetap berada dalam keadaan awalnya, diam atau bergerak dengan kecepatan awalnya.

Benda akan dikatakan bergerak apabila kedudukan benda tersebut berubah terhadap kerangka acuannya. Kerangka acuan di mana Hukum Newton berlaku disebut *kerangka acuan inersia*. Jika kita memiliki dua kerangka acuan inersia yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap yang lainnya, maka tidak dapat ditentukan bagian mana yang diam dan bagian mana yang bergerak atau keduanya bergerak. Hal ini merupakan konsep **Relativitas Newton**, yang menyatakan “*gerak mutlak tidak dapat dideteksi*”.

Konsep ini dikenal oleh para ilmuwan pada abad ke-17. Tetapi, pada akhir abad ke-19 pemikiran ini berubah. Sejak saat itu konsep relativitas Newton tidak berlaku lagi dan gerak mutlak dideteksi dengan prinsip pengukuran kecepatan cahaya.

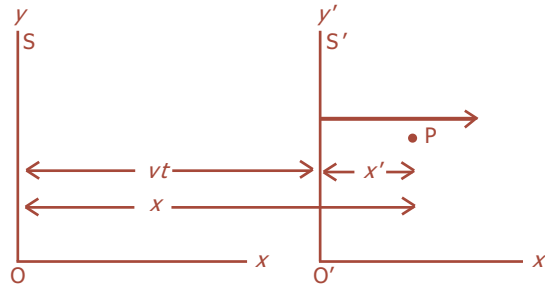
Komet

Kolom mengingat

Semua kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap kerangka acuan inersia juga berlaku sebagai kerangka acuan inersia.

Transformasi Galileo

Pada sudut pandang klasik atau Galileo, jika terdapat dua kerangka acuan S dan S' yang masing-masing dicirikan dengan sumbu koordinat yang ditunjukkan Gambar 10.2. Sumbu x dan x' saling berimpitan, dan diasumsikan kerangka S' bergerak ke kanan (arah x) dengan kecepatan v relatif terhadap S. Untuk menyederhanakan, diasumsikan bahwa acuan O dan O' dari kedua kerangka acuan saling berimpit pada $t = 0$.



Gambar 10.2 Kerangka acuan S' bergerak ke kanan dengan kecepatan v relatif terhadap kerangka S.

Sekarang, dimisalkan terjadi sesuatu di titik P yang dinyatakan dalam koordinat x', y', z' dalam kerangka acuan S' pada saat t' . Bagaimana koordinat P di S? Perlu diketahui, karena S dan S' mula-mula berimpitan, setelah t , S' akan bergerak sejauh vt' . Sehingga pada saat t' akan berlaku:

$$x = x' + vt' \dots\dots\dots (10.1)$$

$$y = y' \dots\dots\dots (10.2)$$

$$z = z' \dots\dots\dots (10.3)$$

$$t = t' \dots\dots\dots (10.4)$$

Persamaan-persamaan tersebut dinamakan persamaan **transformasi Galileo**.

Jika titik P pada Gambar 10.2 menunjukkan sebuah benda yang bergerak, maka komponen vektor kecepatannya di S' dimisalkan u'_x, u'_y, u'_z . Diperoleh $u'_x = Dx'/Dt'$, $u'_y = Dy'/Dt'$, dan $u'_z = Dz'/Dt'$. Jika pada t'_1 partikel berada di x'_1 dan sesaat kemudian, t'_2 berada di x'_2 , diperoleh:

$$u'_x = \frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1} = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} \dots\dots\dots (10.5)$$

Jadi, kecepatan P seperti terlihat dari S akan memiliki komponen u_x, u_y , dan u_z . Untuk komponen yang berhubungan dengan komponen kecepatan di S' diperoleh:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{(x'_2 + vt'_2) - (x'_1 + vt'_1)}{t'_2 - t'_1} \\ &= \frac{(x'_2 - x'_1) + v(t'_2 - t'_1)}{t'_2 - t'_1} \\ &= \frac{\Delta x'}{\Delta t'} + v = u'_x + v \end{aligned}$$

Komet
Kolom mengingat

u digunakan untuk membedakannya dari kecepatan relatif antara kedua kerangka, v .

Dapat disimpulkan bahwa:

$$u_x = u'_x + v \dots\dots\dots (10.6)$$

$$u_y = u'_y \dots\dots\dots (10.7)$$

$$u_z = u'_z \dots\dots\dots (10.8)$$

yang disebut persamaan transformasi kecepatan Galileo.

Contoh Soal

Sebuah transformasi koordinat x' pada transformasi Galileo dinyatakan oleh $x' = x - vt$.

Buktikan bahwa transformasi Galileo untuk kecepatan adalah $u'_x = u_x - v$!

Penyelesaian:

Transformasi kecepatan, u'_x terhadap u_x dapat diperoleh jika tiap koordinat diturunkan terhadap peubah waktu t .

$$x' = x - vt$$

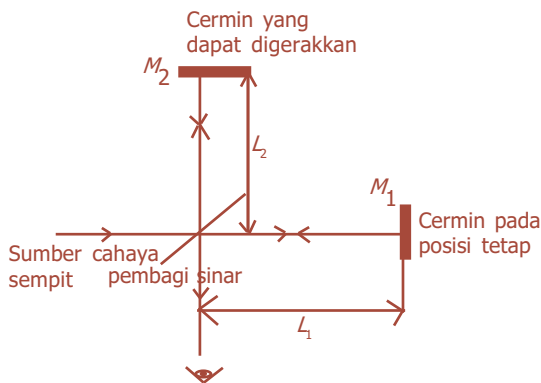
$$\frac{d}{dt}(x') = \frac{d}{dt}(x - vt)$$

$$\frac{dx'}{dt} \text{ adalah } u'_x \text{ dan } \frac{dx}{dt} \text{ adalah } u_x.$$

$$\text{Jadi, } \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v, \quad u'_x = u_x - v \text{ (terbukti).}$$



B. Percobaan Michelson - Morley



Gambar 10.3 Skema percobaan interferometer Michelson.

Pada tahun 1887, Albert Michelson (1852 - 1931) dan Edward Morley (1838 - 1923) melakukan suatu percobaan untuk mengukur kecepatan bumi dengan eter, yaitu suatu medium hipotetik yang dahulu diyakini diperlukan untuk membantu perambatan radiasi elektromagnetik. Dengan menggunakan interferometer Michelson, mereka berharap dapat mengamati suatu pergeseran pada pita interferensi yang terbentuk saat alat diputar 90° , untuk menunjukkan bahwa laju cahaya yang diukur pada arah rotasi bumi, atau arah lintasan orbit, berbeda dengan laju pada arah 90° terhadap arah rotasi.

Dalam percobaan ini, yang ditunjukkan pada Gambar 10.3, satu berkas cahaya bergerak menurut arah gerak Bumi dan yang lain bergerak tegak lurus terhadap gerak ini. Perbedaan antara waktu tempuh berkas tergantung pada kecepatan Bumi dan dapat ditentukan dengan pengukuran interferensi.

Kita anggap interferometer tersebut diarahkan sedemikian rupa, sehingga berkas yang mengenai cermin M_1 berada dalam gerak Bumi yang diandaikan. Berkas yang memantul dari pembagi berkas dan mengenai cermin M_2 bergerak dengan kecepatan tertentu (relatif terhadap Bumi) yang tegak lurus terhadap kecepatan bumi. Kedua sinar dari cermin M_1 dan M_2 akan sampai pada pengamat. Jika ada eter yang bergerak dengan kelajuan v , maka akan timbul perbedaan waktu sebesar:

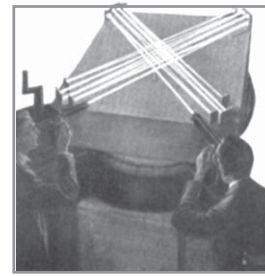
$$\Delta t = \frac{L \cdot v^2}{c^2} \dots\dots\dots (10.9)$$

Dengan c menyatakan kecepatan cahaya.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

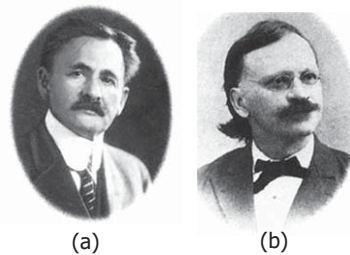
dan L adalah jarak cermin pada pembagi sinar.

Perbedaan waktu tersebut dapat dideteksi dengan mengamati interferensi dari kedua berkas cahaya tadi. Pita interferensi yang diamati dalam kedudukan pertama haruslah mengalami pergeseran. Akan tetapi, pada kenyataannya, tidak ditemukan adanya pergeseran. Percobaan yang sama dilakukan dengan berbagai keadaan, dan hasil yang diperoleh menunjukkan tetap tidak ditemukan adanya pergeseran. Jadi, dapat disimpulkan bahwa hipotesis yang menyatakan keberadaan eter tidak benar, dalam arti bahwa eter tidak ada.



Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 10.4 Percobaan Michelson-Morley.



Gambar 10.5 (a) Michelson, (b) Morley.



C. Postulat Teori Relativitas Khusus

Albert Einstein (1879 - 1955) mendasarkan teorinya pada dua postulat, dan semua kesimpulan mengenai relativitas khusus diturunkan dari kedua postulat tersebut.

a. Postulat Pertama

Postulat pertama menyatakan, "*hukum-hukum fisika adalah sama dalam semua kerangka inersia*". Postulat ini merupakan perluasan prinsip relativitas Newton untuk mencakup semua jenis pengukuran fisis (tidak hanya pengukuran mekanis).

b. Postulat Kedua

Postulat kedua berbunyi, "*kelajuan cahaya adalah sama dalam semua kerangka inersia*". Postulat pertama dikemukakan karena tidak adanya acuan universal sebagai acuan mutlak. Sementara itu, postulat kedua memiliki implikasi yang sangat luas dengan kecepatan, panjang, waktu, dan massa benda yang semuanya bersifat relatif.



Massa suatu objek meningkat pesat ketika melaju mendekati kecepatan cahaya. Persamaan-persamaan Einstein meramal bahwa massa suatu objek akan membesar tak terhingga ketika melaju secepat cahaya. Pesawat yang melaju lebih cepat daripada cahaya mungkin hanya ada di dalam cerita fiksi.

Berdasarkan teori relativitas, S' yang bergerak ke kanan relatif terhadap S ekuivalen dengan S yang bergerak ke kiri relatif terhadap S' .

Invers persamaan (10.17) dan (10.18) dinyatakan:
 $x' = \gamma (x - vt)$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

dengan $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Postulat kedua menguraikan sifat sekutu semua gelombang. Misalnya, kecepatan bunyi tidak tergantung pada gerak sumber bunyi. Apabila mobil yang datang mendekat membunyikan klaksonnya, frekuensi yang terdengar akan meningkat sesuai dengan efek Doppler yang telah kita bahas pada bab III, tetapi kecepatan gelombang yang merambat melalui udara tidak tergantung pada kecepatan mobilnya. Kecepatan gelombang hanya tergantung pada sifat udara, misalnya temperatur.

1. Transformasi Lorentz

Transformasi Galileo hanya berlaku jika kecepatan-kecepatan yang digunakan tidak bersifat relativistik, yaitu jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya, c . Sebagai contoh, pada persamaan (10.6) berlaku untuk kecepatan cahaya, karena cahaya yang bergerak di S' dengan kecepatan $u'_x = c$ akan memiliki kecepatan $c + v$ di S . Sesuai dengan teori relativitas bahwa kecepatan cahaya di S juga adalah c . Sehingga, diperlukan persamaan transformasi baru untuk bisa melibatkan kecepatan relativistik.

Berdasarkan Gambar 10.2, kita asumsikan transformasi bersifat linier dalam bentuk:

$$x = \gamma (x' + vt') \dots\dots\dots (10.10)$$

$$y = y' \dots\dots\dots (10.11)$$

$$z = z' \dots\dots\dots (10.12)$$

Kita asumsikan bahwa y dan z tidak berubah karena diperkirakan tidak terjadi kontraksi panjang pada arah ini. Persamaan invers harus memiliki bentuk yang sama di mana v diganti dengan $-v$, sehingga diperoleh:

$$x' = \gamma (x - vt) \dots\dots\dots (10.13)$$

Jika pulsa cahaya meninggalkan titik acuan S dan S' pada $t = t' = 0$, setelah waktu t menempuh sumbu x sejauh $x = ct$ (di S), atau $x' = ct'$ (di S'). Jadi, dari persamaan (10.10):
 $c \cdot t = \gamma (ct' + vt') = \gamma (c + v) t' \dots\dots\dots (10.14)$
 $c \cdot t' = \gamma (ct - vt) = \gamma (c - v) t \dots\dots\dots (10.15)$
dengan mensubstitusikan t' persamaan (10.15) ke persamaan (10.14) akan diperoleh:

$$c \cdot t = \gamma (c + v) \gamma (c - v) (t/c) = \gamma^2 (c^2 - v^2) t/c$$

Dengan mengalikan $\frac{1}{t}$ pada tiap ruas diperoleh nilai γ :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots (10.16)$$

Untuk menentukan hubungan t dan t' , kita gabungkan persamaan (10.10) dan (10.13), sehingga diperoleh:

$$x' = \gamma (x - vt) = \gamma \{ \gamma (x' + vt') - vt \}$$

Diperoleh nilai $t = \gamma (t' + vx'/c^2)$. Sehingga secara keseluruhan didapatkan:

$$x = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} (x' + vt') \dots\dots\dots (10.17)$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} (t' + \frac{vx'}{c^2}) \dots\dots\dots (10.18)$$

yang menyatakan persamaan **transformasi Lorentz**.

Untuk transformasi kecepatan relativistik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (10.5), yaitu:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ &= \frac{\gamma(\Delta x' + v\Delta t')}{\gamma(\Delta t' + v\Delta x'/c^2)} = \frac{(\Delta x'/\Delta t') + v}{1 + (v/c^2)(\Delta x'/\Delta t')} \\ &= \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka disimpulkan:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2} \dots\dots\dots (10.19)$$

$$u_y = \frac{u'_y \sqrt{1-v^2/c^2}}{1 + vu'_x/c^2} \dots\dots\dots (10.20)$$

$$u_z = \frac{u'_z \sqrt{1-v^2/c^2}}{1 + vu'_x/c^2} \dots\dots\dots (10.21)$$



Dengan adanya transformasi Lorentz, maka masalah perbedaan pengukuran panjang, massa, dan waktu, antara di Bumi dan di luar angkasa dapat terpecahkan.

2. Dilatasi Waktu

Akibat penting postulat Einstein dan transformasi Lorentz adalah bahwa selang waktu antara dua kejadian yang terjadi pada tempat yang sama dalam suatu kerangka acuan selalu lebih singkat daripada selang waktu antara kejadian sama yang diukur dalam kerangka acuan lain yang kejadiannya terjadi pada tempat yang berbeda.

Pada dua kejadian yang terjadi di x'_0 pada waktu t'_1 dan t'_2 dalam kerangka S' , kita dapat menentukan waktu t_1 dan t_2 untuk kejadian ini dalam kerangka S dari persamaan (10.18). Kita peroleh:

$$t_1 = \gamma \left(t'_1 + \frac{wx'_0}{c^2} \right)$$

$$t_2 = \gamma \left(t'_2 + \frac{wx'_0}{c^2} \right)$$

Sehingga, dari kedua persamaan tersebut diperoleh:

$$t_2 - t_1 = \gamma (t'_2 - t'_1) \dots\dots\dots (10.22)$$

Waktu di antara kejadian yang terjadi pada tempat yang sama dalam suatu kerangka acuan disebut **waktu patut**, t_p . Dalam hal ini, selang waktu $\Delta t_p = t'_2 - t'_1$ yang diukur dalam kerangka S' adalah waktu patut. Selang waktu Δt yang diukur dalam kerangka sembarang lainnya selalu lebih lama dari waktu patut. Pemekaran waktu ini disebut *dilatasi waktu*, yang besarnya:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p \dots\dots\dots (10.23)$$

Contoh Soal

Sebelum melakukan perjalanan ke ruang antariksa, seorang astronaut memiliki laju detak jantung terukur 80 detak/menit. Ketika astronaut mengangkasa dengan kecepatan $0,8 c$ terhadap Bumi, berapakah laju detak jantung astronaut tersebut menurut pengamat di Bumi?

Penyelesaian:

Kecepatan astronaut terhadap Bumi:

$$v = 0,8 c$$

$$\frac{v}{c} = 0,8$$

γ dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = \frac{1}{0,6} = \frac{10}{6}$$

Waktu patut, Δt_p adalah selang waktu detak jantung astronaut yang terukur di Bumi. Jadi, $\Delta t_p = 1 \text{ menit}/80 \text{ detak}$.

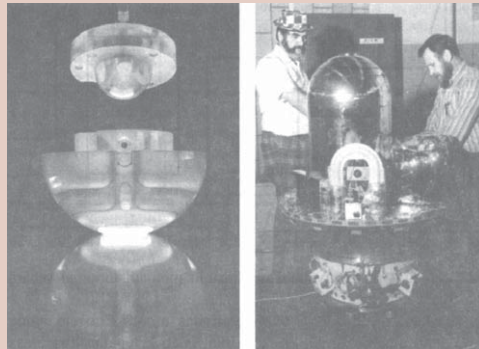
Selang waktu relativistik, Δt adalah selang waktu detak jantung astronaut yang sedang mengangkasa diukur oleh pengamat di Bumi. Pemekaran waktu dihitung melalui persamaan (10.23):

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_p = \frac{10}{6} (1 \text{ menit}/80 \text{ detak}) = 1 \text{ menit}/\left(\frac{6}{10} \times 80 \text{ detak}\right) = 1 \text{ menit}/48 \text{ detak}.$$

Uji Kemampuan 10.1

1. Antariksawan dalam sebuah wahana antariksa melakukan perjalanan menjauhi Bumi dengan $v = 0,6c$ beristirahat di ruang kendali, dan mengatakan bahwa mereka akan tidur siang selama 1 jam dan akan menelepon kembali. Berapa lamakah tidur siang mereka itu sebagaimana yang diukur di Bumi?
2. Seberkas partikel radioaktif diukur saat ditembakkan menyeberangi laboratorium. Diketahui bahwa rata-rata setiap partikel “hidup” selama $2,0 \times 10^{-8}$ sekon. Setelah waktu tersebut, partikel itu akan berubah menjadi bentuk baru. Ketika berada dalam keadaan diam di laboratorium, partikel yang sama rata-rata “hidup” selama $0,75 \times 10^{-8}$ sekon. Berapa cepat partikel dalam berkas tersebut bergerak?

Percikan Fisika



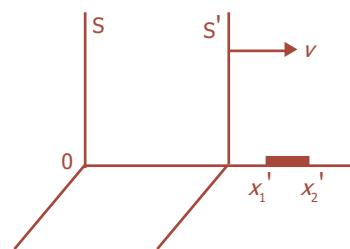
Bola Kuarsa dan Jam Maser Hidrogen

Bola kuarsa (gambar sebelah kiri) di bagian atas wadah tersebut mungkin merupakan benda paling bulat di dunia. Bola ini didesain untuk berputar sebagai giroskop dalam satelit yang mengorbit Bumi. Relativitas umum memperkirakan bahwa rotasi bumi akan menyebabkan sumbu rotasi giroskop untuk beralih secara melingkar pada laju 1 putaran dalam 100.000 tahun.

Jam maser (gambar sebelah kanan) hidrogen yang teliti di atas diluncurkan dalam satelit pada 1976, dan waktunya dibandingkan dengan waktu jam yang identik di Bumi. Sesuai dengan perkiraan relativitas umum, jam yang di Bumi, yang di sini potensial gravitasinya lebih rendah, “terlambat” kira-kira $4,3 \times 10^{-10}$ sekon setiap sekon dibandingkan dengan jam yang mengorbit Bumi pada ketinggian kira-kira 10.000 km.

3. Kontraksi Panjang

Kontraksi panjang adalah penyusutan panjang suatu benda akibat gerak relatif pengamat atau benda yang bergerak mendekati cepat rambat cahaya. Penyusutan panjang yang terjadi merupakan suatu fenomena yang berhubungan dengan pemekaran waktu. Panjang benda yang diukur dalam kerangka acuan di mana bendanya berada dalam keadaan diam disebut *panjang patut* (panjang benda menurut pengamat), l . Kita tinjau sebatang tongkat dalam keadaan diam di S' dengan satu ujung di x_2' dan ujung lainnya di x_1' , seperti pada Gambar 10.6. Panjang tongkat dalam kerangka ini adalah $l = x_2' - x_1'$.



Gambar 10.6 Kontraksi panjang.

Untuk menentukan panjang tongkat di kerangka S, didefinisikan bahwa $l = x_2 - x_1$. Berdasarkan invers dari persamaan (10.17) akan diperoleh:

$$x_2' = \gamma(x_2 - vt_2) \dots\dots\dots (10.24)$$

dan

$$x_1' = \gamma(x_1 - vt_1) \dots\dots\dots (10.25)$$

Karena waktu pengukuran x_1 sama dengan waktu pengukuran x_2 , maka $t_1 = t_2$, sehingga:

$$x_2' - x_1' = \gamma(x_2 - x_1)$$

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\gamma}(x_2' - x_1') = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}(x_2' - x_1')$$

$$\text{atau} \quad l = \frac{1}{\gamma} l_0 = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l_0 \dots\dots\dots (10.26)$$

dengan l_0 adalah panjang benda sebenarnya, v adalah kecepatan benda, c adalah cepat rambat cahaya, dan l adalah panjang benda menurut pengamat.

Adanya dilatasi waktu yang dipengaruhi oleh gerak benda relatif, akan memengaruhi pengukuran panjang. Panjang benda yang bergerak terhadap pengamat kelihatannya lebih pendek daripada panjang sebenarnya.

Contoh Soal

Sebuah tongkat dengan panjang 50 cm, bergerak dengan kecepatan v relatif terhadap pengamat dalam arah menurut panjangnya. Tentukan kecepatannya, jika panjang tongkat menurut pengamat adalah 0,422 m!

Penyelesaian:

Diketahui: $l_0 = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$
 $l = 0,422 \text{ m}$

Ditanya: $v = \dots ?$

Jawab:

Berdasarkan persamaan (10.26) maka kita dapat menentukan kecepatan benda, yaitu:

$$l = \frac{1}{\gamma} l_0$$

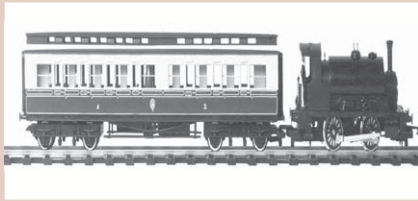
$$\gamma = \frac{l_0}{l} = \frac{0,5 \text{ m}}{0,422 \text{ m}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,5}{0,422}$$

$$(0,5)^2 \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)^2 = (0,422)^2$$

$$\begin{aligned}
 0,25 - 0,25 \frac{v^2}{c^2} &= 0,178 \\
 0,25 \frac{v^2}{c^2} &= 0,072 \\
 \frac{v^2}{c^2} &= 0,288 \\
 v &= 0,54 \, c
 \end{aligned}$$

Percikan Fisika



Kereta Api Mengecil

Kereta api yang melaju dengan kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya akan tampak lebih pendek, tetapi tingginya tidak berubah. Hal ini tidak tampak pada kecepatan rendah. Sebuah mobil yang melaju dengan kecepatan 160 km (100 mil) per jam akan tampak mengecil satu per dua triliun persen. Dalam persamaan-persamaan itu waktu tampak ditandai dengan tanda minus. Jadi, apabila panjang mengecil, sebaliknya waktu membesar.

Uji Kemampuan 10.2

1. Sebuah pesawat terbang yang panjang sebenarnya 60 m, bergerak terhadap Bumi dengan laju 450 m/s. Tentukan penyusutan panjang pesawat tersebut bagi pengamat di Bumi?
2. Wahana antariksa dengan panjang patut 100 m melewati pengamat dengan kecepatan tinggi. Pengamat mengukur panjang wahana antariksa itu 85 cm. Berapakah kecepatan wahana antariksa tersebut?



D. Massa, Momentum, dan Energi Relativistik

1. Massa Relativistik

Pada subbab sebelumnya telah dijelaskan bahwa pengukuran waktu dan pengukuran panjang adalah fungsi-fungsi dari kecepatan v . Lalu, bagaimana dengan massanya? Menurut teori relativitas khusus bahwa massa relativistik m dari sebuah partikel yang bergerak dengan laju v terhadap pengamat dinyatakan:

$$m = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}$$

Dengan m_0 adalah massa diam, yaitu massa yang diukur bila partikel tersebut berada dalam keadaan diam ($v = 0$) dalam suatu kerangka acuan, dan m disebut massa relativistik partikel.

Contoh Soal

Astronaut yang bermassa 96 kg di Bumi, berada dalam sebuah roket yang bergerak dengan kelajuan $0,8 c$. Tentukan massa astronaut tersebut ketika berada dalam roket!

Penyelesaian:

Massa diam, $m_0 = 90 \text{ kg}$

kelajuan roket, $v = 0,8 c \Leftrightarrow \frac{v}{c} = 0,8$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = \frac{10}{6}$$

massa relativistik m terukur adalah

$$\begin{aligned} m &= \gamma \cdot m_0 \\ &= \frac{10}{8} (96) = 120 \text{ kg} \end{aligned}$$

2. Momentum Relativistik

Momentum suatu partikel didefinisikan sebagai perkalian massa dan kecepatannya. Berdasarkan hukum kekekalan momentum linier dalam relativitas umum, maka didefinisikan kembali momentum sebuah partikel yang massa diamnya m_0 dan lajunya v adalah:

$$p = m \cdot v = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots (10.28)$$

3. Energi Relativistik

Dalam mekanika klasik, usaha yang dilakukan oleh gaya yang bekerja pada partikel sama dengan perubahan pada energi kinetik partikel tersebut. Sebagaimana dalam mekanika klasik, kita akan mendefinisikan energi kinetik sebagai kerja yang dilakukan oleh gaya dalam mempercepat partikel dari keadaan diam hingga mencapai kecepatan tertentu. Jadi,

$$\begin{aligned} Ek &= \int_{v=0}^v \sum F \cdot ds = \int_0^v \frac{dp}{dt} ds \\ &= \int_0^v v \cdot dp = \int_0^v v \cdot d \left(\frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \dots\dots\dots (10.29) \end{aligned}$$

dengan $v = \frac{ds}{dt}$, jadi:

$$d \left(\frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} dv$$

Kemudian, persamaan tersebut disubstitusikan ke persamaan (10.29), maka diperoleh:

$$\begin{aligned} E_k &= \int_0^v v \cdot d \left(\frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \int_0^v m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} v \cdot dv \\ &= m_0 \cdot c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \end{aligned}$$

atau

$$E_k = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2 \dots\dots\dots (10.30)$$

Suku kedua persamaan (10.30) tidak bergantung pada kecepatan dan disebut **energi diam** partikel E_0 , yang merupakan perkalian massa diam dengan c^2 .

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 \dots\dots\dots (10.31)$$

Jumlah energi kinetik dan energi diam disebut **energi relativistik**, yaitu

$$\begin{aligned} E &= E_k + E_0 \\ &= \left(\frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2 \right) + m_0 \cdot c^2 \end{aligned}$$

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots (10.32)$$

Contoh Soal

Sebuah proton bergerak dengan kecepatan $0,8 \ c$. Hitunglah energi diam dan energi total proton tersebut!

Penyelesaian:

Kecepatan gerak proton $v = 0,8 \ c \Leftrightarrow \frac{v}{c} = 0,8$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = \frac{10}{6}$$

Energi proton

$$E_0 = m_0 c^2 = (1,6 \times 10^{-27})(3 \times 10^8)^2 \text{ J} = 14,4 \times 10^{-11} \text{ J} = \frac{14,4 \times 10^{-11}}{1,6 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$

$$= 9 \times 10^8 \text{ eV} = 900 \text{ MeV}$$

Energi total

$$E = \gamma \cdot E_0 = \frac{10}{6} (900 \text{ MeV}) = 1.500 \text{ MeV}$$

Uji Kemampuan 10.3

Sebuah elektron memiliki energi diam 0,51 MeV bergerak dengan kecepatan $0,6c$. Berapakah energi total, energi kinetik, dan momentum elektron tersebut?



E. Aplikasi Kesetaraan Massa dan Energi

Albert Einstein pada tahun 1905 menyatakan bahwa ada kesetaraan antara massa dan energi pada benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya. Pada penyinaran zat radioaktif, selalu disertai energi yang sangat besar. Energi ini diserap dan berubah menjadi panas. Jika benda diam menerima energi kinetik, massa relatif benda akan bertambah. Tetapi, jika kehilangan energi, massa benda relatif akan berkurang. Einstein merumuskan bahwa energi sebanding dengan massa dan kuadrat kecepatan cahaya, yang dinyatakan:

$$E = m \cdot c^2 \dots\dots\dots (10.33)$$

Dalam fisika klasik kita mengenal dua prinsip kekekalan, yaitu kekekalan massa (klasik) dan kekekalan energi. Dalam relativitas, kedua prinsip kekekalan tersebut bergabung menjadi prinsip kekekalan massa-energi, dan memegang peranan penting dalam reaksi inti.

Pada sebuah atom hidrogen mempunyai massa diam $1,00797 \text{ u}$ setara dengan $938,8 \text{ MeV}$. Jika tenaga yang mencukupi ($13,58 \text{ eV}$) ditambahkan untuk mengionisasi hidrogen tersebut, yaitu untuk memecahkan hidrogen menjadi bagian-bagian pembentuknya (proton dan elektron), maka perubahan pecahan massa diam sistem tersebut adalah:

$$\frac{13,58 \text{ eV}}{938,8 \times 10^6 \text{ eV}} = 1,45 \times 10^{-8}.$$

Nilai itu setara dengan $1,45 \times 10^{-6}$ persen, yang terlalu kecil untuk diukur. Tetapi, untuk sebuah inti seperti deuteron dengan massa diam $2,01360 \text{ u}$ yang setara dengan $1876,4 \text{ MeV}$, maka diperlukan tambahan tenaga sebesar $2,22 \text{ MeV}$ untuk memecahkan deuteron tersebut menjadi bagian pembentuknya. Perubahan pecahan massa diam sistem tersebut adalah:

$$\frac{2,22 \text{ MeV}}{1876,4 \text{ MeV}} = 1,18 \times 10^{-3}$$

atau sekitar $0,12$ persen, sehingga dengan mudah dapat diukur. Hal ini merupakan ciri perubahan massa diam pecahan dalam reaksi nuklir, sehingga hukum kekekalan energi-massa harus digunakan dalam suatu eksperimen reaksi nuklir, agar diperoleh kesesuaian dengan teorinya. **Reaksi fisi** adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi dua buah inti atau lebih yang lebih ringan, disertai pancaran energi yang sangat besar. Sementara itu, **reaksi fusi** merupakan reaksi penggabungan beberapa inti ringan, disertai pengeluaran energi yang sangat besar. Proses ini merupakan kebalikan dari fisi, tetapi hasil terakhir sama yaitu energi yang dahsyat.

Contoh Soal

Sebuah elektron dipercepat dari keadaan diam melalui beda potensial $1,5 \text{ MV}$ sehingga memperoleh energi $1,5 \text{ MeV}$. Tentukan laju akhirnya!

Penyelesaian:

Dengan menggunakan persamaan: $Ek = mc^2 - m_0c^2$

$$Ek = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}} - m_0c^2$$

Diketahui bahwa $Ek = Ep$, maka $Ek = (1,5 \times 10^6 \text{ eV})(1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 2,4 \times 10^{-13} \text{ J}$

Dimisalkan $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$, maka $(\gamma m - m) = \frac{Ek}{c^2} = \frac{2,4 \times 10^{-13} \text{ J}}{(3,0 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 2,67 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Diketahui $m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$, maka $\gamma m = 3,58 \times 10^{-30} \text{ kg}$

Untuk menentukan laju dengan menggunakan persamaan:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

$$\frac{1}{\gamma^2} = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \left(\frac{m}{\gamma m}\right) = \left(\frac{9,1 \times 10^{-31}}{3,58 \times 10^{-30}}\right)^2 = 0,0646$$

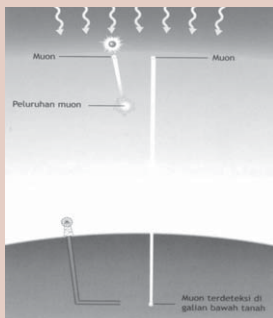
Sehingga, diperoleh $v = c\sqrt{1-0,0646} = 0,967c = 2,9 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Kegiatan

Tujuan : Memahami penerapan teori relativitas dalam kehidupan sehari-hari.

Teori relativitas Einstein memperkirakan adanya efek-efek ganjil ketika suatu benda mendekati kecepatan cahaya. Teori ini mempertimbangkan konsep kerangka acuan inersia. Cobalah kalian mencari sebuah artikel yang menerapkan teori ini. Kemudian, analisislah teori itu berdasarkan sudut pandang kalian, dan presentasikan di depan kelas!

Percikan Fisika



Muon

Sinar kosmis membawa partikel tidak stabil yang disebut *muon*, yang bergerak mendekati kecepatan cahaya. Tanpa relativitas, mereka mungkin telah meluruh dan punah setelah menembus Bumi sedalam 600 m. Sesungguhnya mereka menjangkau jauh ke bawah permukaan tanah karena efek relativitas melambatkan laju peluruhannya.

Fiesta

Fisikawan Kita



Albert Abraham Michelson (1852 - 1931)

Ilmuwan berkebangsaan Amerika Serikat, lahir di Strzelno pada tanggal 19 Desember 1852 dan meninggal di Pasadena pada tanggal 9 Mei 1931. Ia dikenal dalam ketepatan pengukuran dalam bidang optika, meteorologi, astrofisika, dan fisika. Bersama Edward W. Morley dengan alat penemuannya yaitu interferometer, menyelidiki teori gelombang cahaya dan berhasil menetapkan cepat rambat cahaya. Menurut hasil pengamatannya, cepat rambat cahaya selalu konstan. Michelson-Morley makin dikenal setelah teori Relativitas Einstein, karena mereka yang dapat membuktikan bahwa eter (medium rambat cahaya) tidak ada.

Kilas Balik

- ✧ Prinsip relativitas Newton menyatakan bahwa hukum-hukum mekanika berlaku sama pada semua kerangka acuan inersia. Kerangka acuan inersia adalah kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan konstan (tidak mengalami percepatan).

- * Percobaan Michelson-Morley bertujuan untuk membuktikan adanya eter, yaitu medium perambatan cahaya, tetapi hasilnya justru menyatakan bahwa eter tidak ada. Jadi, di alam semesta tidak ada kerangka acuan mutlak yang diam melainkan semuanya adalah relatif.
- * Postulat Einstein dalam Teori Relativitas khusus berbunyi:
 - hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersia,
 - kelajuan cahaya adalah sama dalam semua kerangka inersia.
- * Dalam relativitas Newton, ruang dan waktu dianggap mutlak dan berlaku transformasi Galileo.
- * Dalam relativitas Einstein, ruang dan waktu dianggap relatif dan berlaku transformasi Lorentz.
- * Kontraksi panjang merupakan penyusutan panjang suatu benda akibat gerak relatif pengamat atau benda yang bergerak mendekati cepat rambat cahaya.

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- * Dilatasi waktu memenuhi hubungan:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- * Massa relativistik memenuhi hubungan:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- * Momentum relativistik dari suatu benda yang bergerak dengan kecepatan v adalah:

$$p = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- * Pernyataan untuk energi relativistik suatu benda adalah:

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Pada percobaan Michelson-Morley digunakan suatu alat yang digunakan untuk mendeteksi adanya eter. Alat tersebut disebut

a. detektor	d. spektrometer
b. simulator	e. interferometer
c. reflektor	

2. Salah satu postulat relativitas Einstein adalah
 - a. selang waktu pengamat yang diam dan selang waktu pengamat yang bergerak tidak sama
 - b. panjang benda saat diam dan panjang benda saat bergerak tidak sama
 - c. massa benda saat diam dan massa benda saat bergerak tidak sama
 - d. kecepatan cahaya dalam vakum adalah sama untuk semua pengamat baik diam maupun bergerak
 - e. semua gerakan benda di atas permukaan bumi memiliki kecepatan mutlak
3. Kereta api bergerak dengan kelajuan 20 m/s terhadap Bumi. Bila penumpang berjalan di dalam kereta api dengan kelajuan 5 m/s terhadap kereta api dan searah dengan gerak kereta api, maka kelajuan penumpang terhadap Bumi adalah
 - a. 20 m/s
 - b. 25 m/s
 - c. 30 m/s
 - d. 35 m/s
 - e. 40 m/s
4. Sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan $0,6c$ terhadap Bumi. Pesawat menembakkan peluru dengan kecepatan $0,4c$ searah dengan gerak pesawat. Kecepatan peluru terhadap Bumi adalah
 - a. $0,2c$
 - b. $0,5c$
 - c. $0,6c$
 - d. $0,8c$
 - e. c
5. Sebuah tangki kubus memiliki volume 1 m^3 . Volume tangki tersebut menurut pengamat yang bergerak dengan kecepatan $0,8c$ sepanjang rusuk kubus adalah
 - a. $0,4 \text{ m}^3$
 - b. $0,5 \text{ m}^3$
 - c. $0,6 \text{ m}^3$
 - d. $0,8 \text{ m}^3$
 - e. $1,0 \text{ m}^3$
6. P dan Q adalah sepasang anak kembar. P berkelana di antariksa dengan pesawat berkecepatan $0,8 c$. Setelah 12 tahun berkelana akhirnya P pulang ke Bumi. Menurut Q perjalanan P telah berlangsung selama
 - a. 8 tahun
 - b. 10 tahun
 - c. 12 tahun
 - d. 15 tahun
 - e. 20 tahun

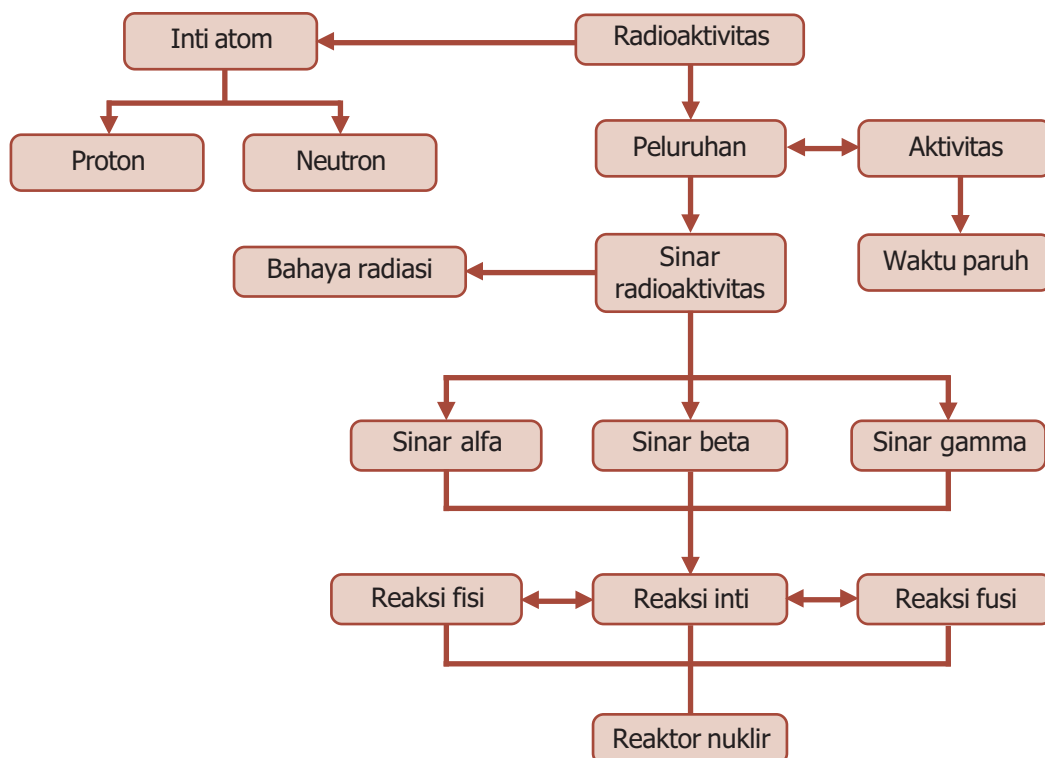
7. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan $0,8c$ dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,6c$ adalah
 - a. $3 : 4$
 - b. $4 : 3$
 - c. $9 : 16$
 - d. $16 : 9$
 - e. $9 : 2$
8. Agar massa benda menjadi dua kali massa diamnya, maka benda harus bergerak dengan kecepatan
 - a. $\frac{1}{2}c$
 - b. $\frac{1}{2}\sqrt{3}c$
 - c. c
 - d. $2c$
 - e. $2,5c$
9. Kecepatan suatu benda yang massanya 1% lebih besar dari massa diamnya adalah
 - a. $0,14c$
 - b. $0,22c$
 - c. $0,36c$
 - d. $0,42c$
 - e. $0,64c$
10. Energi diam sebuah elektron $0,5 \text{ MeV}$ dan massa elektron 5 kali massa diamnya. Energi kinetik elektron tersebut adalah
 - a. $0,5 \text{ MeV}$
 - b. $1,0 \text{ MeV}$
 - c. $1,5 \text{ MeV}$
 - d. $2,0 \text{ MeV}$
 - e. $2,5 \text{ MeV}$

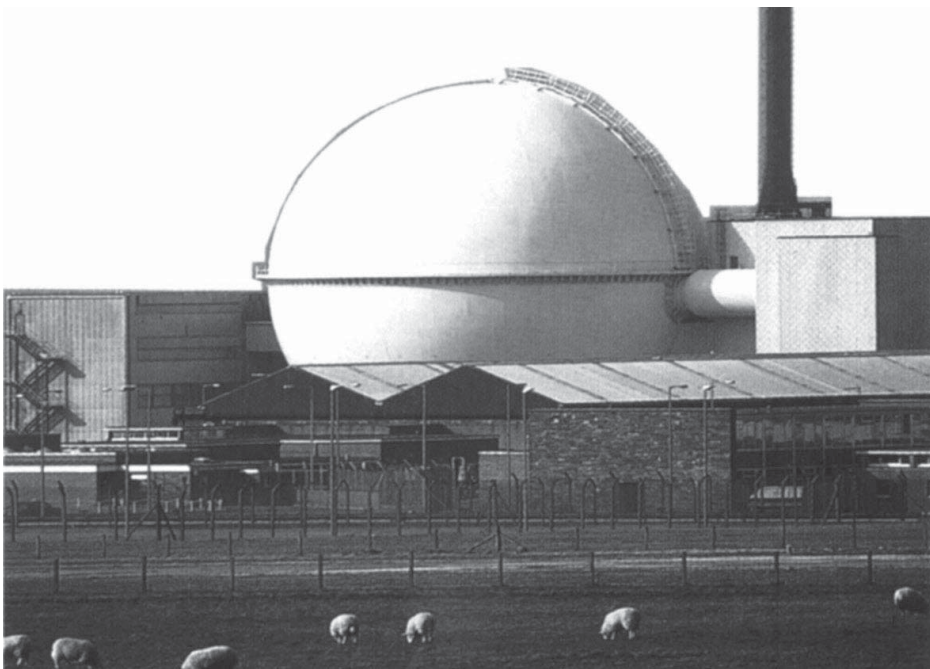
B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Sebuah pesawat tempur bergerak terhadap Bumi dengan laju 750 m/s . Panjang pesawat sebenarnya adalah 20 m . Berapakah penyusutan panjang pesawat tersebut bagi pengamat di Bumi?
2. Seorang astronaut bermassa 80 kg di Bumi. Tentukan massa astronaut tersebut ketika berada dalam roket yang meluncur dengan kelajuan $0,8c$!
3. Sebuah proton bergerak dengan kecepatan $0,4c$. Hitung energi diam, energi total, dan energi kinetik proton tersebut dalam MeV , jika diketahui massa proton $1,6 \times 10^{-37} \text{ kg}$, dan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$!
4. Tentukan kelajuan sebuah elektron yang memiliki massa tiga kali massa diamnya!
5. Sebuah elektron bergerak dengan kelajuan $\frac{3}{4}c$. Jika massa elektron diketahui sebesar $9 \times 10^{-31} \text{ kg}$, dan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, tentukan momentum elektron tersebut!

PETA KONSEP

Bab 11 Fisika Inti dan Radioaktivitas





- Reaktor nuklir menggunakan unsur radioaktivitas.

Sumber: *Ensiklopedia Iptek*,
PT Lentera Abadi, 2005

Salah satu bahan bakar dalam stasiun pembangkit tenaga nuklir adalah uranium. Uranium merupakan salah satu unsur radioaktif yang memiliki nomor atom tertinggi dari semua unsur atom. Energi dihasilkan ketika intinya membelah membentuk unsur-unsur lain. Selain uranium, masih banyak lagi unsur radioaktif yang sangat berguna bagi kita, karena unsur radioaktif adalah unsur yang mudah meluruh membentuk unsur lain. Nah, untuk mengetahui tentang unsur radioaktif dan reaksi pembelahan atau peluruhannya ikuti pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

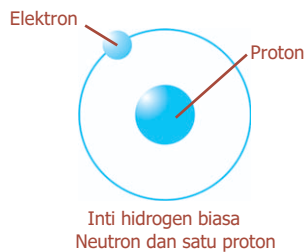
massa atom, nomor atom, peluruhan, radioaktivitas, reaktor nuklir, waktu paruh

Inti atom merupakan partikel yang memiliki massa dan bermuatan positif. Sifat-sifat utama dari atom secara keseluruhan akan memengaruhi sifat zatnya. Jadi, untuk mengetahui sifat-sifat molekul suatu zat akan lebih baik jika kita mempelajarinya mulai dari struktur inti zat yang bersangkutan.

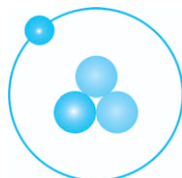
Struktur inti terdiri atas proton dan neutron yang disebut **nukleon**. Pada tahun 1911, berdasarkan eksperimen yang dilakukannya, Rutherford berpendapat bahwa muatan positif atom dikonsentrasikan di pusat atom sebagai inti atom. Kemudian, ia melakukan eksperimen dengan menembakkan partikel alfa pada atom yang diamati. Berdasarkan pengamatannya, partikel yang ditembakkan dihamburkan. Dari percobaan hamburan ini diambil kesimpulan mengenai distribusi muatan listrik yang ada di dalam atom sasaran. Pada saat itu, Rutherford belum bisa menjelaskan tentang kestabilan inti atom sehingga gerak elektron di dalam atom belum bisa dijelaskan. Tidak lama kemudian Niels Bohr mengembangkan teori mengenai struktur atom berdasarkan penemuan-penemuan terdahulu. Sampai sekarang model atom Bohr-Rutherford terus dikembangkan dalam fisika nuklir.



A. Partikel Penyusun Inti Atom



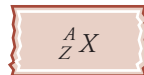
Inti hidrogen biasa
Neutron dan satu proton



Tritium memiliki dua neutron

Gambar 11.1 Struktur inti atom.

Semua atom dapat diidentifikasi berdasarkan jumlah proton dan neutron yang dikandungnya. Jumlah proton dalam inti setiap atom suatu unsur disebut **nomor atom** (Z). Dalam suatu atom netral jumlah proton sama dengan jumlah elektron, sehingga nomor atom juga menandakan jumlah elektron yang ada dalam atom. **Nomor massa** (A) adalah jumlah total neutron dan proton yang ada dalam inti atom suatu unsur. Secara umum sebuah inti atom dinotasikan:



Jumlah neutron dalam suatu atom sama dengan selisih antara nomor massa dan nomor atom, atau $A - Z$. Sebuah atom memiliki tiga komponen dasar yang sangat penting yaitu elektron, proton, dan neutron.

Tabel 11.1 menunjukkan massa dan muatan dari ketiga partikel tersebut.

Tabel 11.1. Massa dan muatan partikel subatom

Partikel	Massa (g)	Muatan	
		Coulomb	Satuan Massa
Elektron	$9,10939 \times 10^{-28}$	$- 1,6022 \times 10^{-19}$	-1
Proton	$1,67262 \times 10^{-24}$	$+ 1,6022 \times 10^{-19}$	+1
Neutron	$1,67493 \times 10^{-24}$	0	0

1. Massa Atom

Massa suatu atom berhubungan erat dengan jumlah elektron, proton, dan neutron yang dimiliki atom tersebut. Berdasarkan perjanjian internasional, satu atom dari isotop karbon (disebut karbon-12) yang mempunyai enam proton dan enam neutron memiliki massa tepat 12 **satuan massa atom (sma)**. Atom karbon-12 ini dipakai sebagai standar, sehingga satu satuan massa atom didefinisikan sebagai suatu massa yang besarnya tepat sama dengan seperduabelas massa dari satu atom karbon-12.

Massa satu atom karbon-12 = 1 sma.

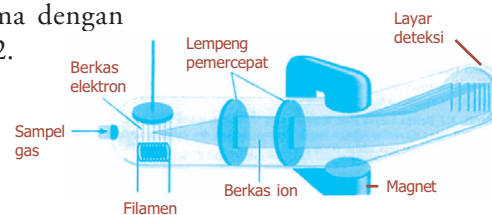
$$1 \text{ sma} = \frac{\text{massa satu atom karbon-12}}{12} = 1,66056 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Satuan massa atom juga dapat dinyatakan berdasarkan prinsip kesetaraan massa dan energi yang dikemukakan oleh Einstein. Sehingga diperoleh:

$$E = mc^2 = \frac{(1,66056 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 931,5 \text{ MeV}$$

Inti sebuah massa atom hampir mengandung seluruh massanya. Hal ini karena inti merupakan tempat terkonsentrasi seluruh massa atom (sesuai model atom Rutherford). Alat yang dapat digunakan untuk mengukur massa atom disebut **spektrometer massa**, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.2.

Pada sebuah spektrometer massa, suatu sampel gas ditembak oleh aliran elektron berenergi tinggi. Tumbukan antara elektron dan atom (atau molekul) gas menghasilkan ion positif dengan terlepasnya satu elektron dari tiap atom atau molekul. Ion-ion tersebut sampai pada sebuah detektor, yang mencatat arus listrik dari tiap jenis ion.



Gambar 11.2 Skema sebuah spektrometer massa.

Komet
Kolom mengingat

Derek massa Δm dinyatakan dalam sma, maka energi ikat inti, ΔE dirumuskan:
 $\Delta E = \Delta m (931 \text{ MeV/sma})$

BETA^B Berita Fisika

Sifat-sifat kimia karbon ditentukan oleh enam muatan negatifnya. Dalam atom karbon-12, inti juga mempunyai enam neutron, yang massanya kira-kira sama dengan proton, membuat bilangan massa atom 12.

Jumlah arus listrik yang dihasilkan sebanding dengan jumlah ion, sehingga dapat ditentukan kelimpahan relatif dari isotop-isotopnya.

2. Defek Massa

Defek massa menunjukkan selisih antara massa diam sebuah inti atom dan jumlah seluruh massa diam masing-masing nukleonnya dalam keadaan tak terikat. Jadi, defek massa adalah kesetaraan massa energi ikat berdasarkan persamaan massa-energi.

Isotop dengan jumlah proton Z dan jumlah neutron $(A - Z)$ memiliki massa inti sebesar:

$$m_i = Z.m_p + (A - Z) m_n \dots\dots\dots (11.1)$$

Dengan m_p adalah massa proton dan m_n adalah massa neutron. Berdasarkan pengukuran diperoleh hasil bahwa massa inti atom lebih kecil daripada massa nukleon. Menurut hukum kesetaraan massa dan energi, besarnya defek massa dinyatakan:

$$m = Z.m_p + (A - Z) m_n - m_i \dots\dots\dots (11.2)$$

Defek massa atau susut massa timbul karena untuk menyusun inti diperlukan energi yang mengikat semua nukleon, yang disebut **energi ikat (binding energy)**, yang diperoleh dari massa inti. Berdasarkan teori relativitas Einstein mengenai kesetaraan antara massa dan energi diberikan oleh:

$$\Delta E = (\Delta m)c^2 \dots\dots\dots (11.3)$$

dengan c adalah kecepatan cahaya.

3. Ukuran dan Bentuk Inti

Eksperimen hamburan Rutherford membuktikan bahwa inti mempunyai ukuran dan bentuk. Volume inti berbagai atom mempunyai nilai yang berbanding lurus dengan banyaknya nukleon yang dikandungnya. Hal ini berarti kerapatan nukleonnya hampir sama dalam bagian dalam inti. Inti atom tidak mempunyai permukaan yang jelas. Meskipun demikian, sebuah inti atom tetap mempunyai jari-jari rata-rata. Jari-jari inti bergantung pada massa, jumlah proton, dan neutron. Jari-jari inti dirumuskan secara empiris sebagai suatu pendekatan, yaitu:

$$R = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (11.4)$$

dengan:

A = nomor massa atom

R = jari-jari inti (fm)

$R_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$

Inti suatu atom telah kita anggap sebagai bola. Tetapi, pada kenyataannya beberapa inti atom mempunyai distribusi muatan tidak simetri bola. Oleh karena volume bola berbanding lurus dengan R^3 , maka persamaan (11.4) menunjukkan bahwa volume inti berbanding lurus dengan nomor massanya. Karena itu, untuk semua inti kecepatannya berbanding lurus dengan AR^3 , sehingga dengan pendekatan tertentu, semua inti mempunyai kerapatan yang sama, yaitu:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3} \dots\dots\dots (11.5)$$

Kerapatan inti mempunyai nilai konstan di bagian dalam inti dan nilai tersebut akan berkurang menuju nol di seluruh daerah permukaan yang kabur.

Contoh Soal

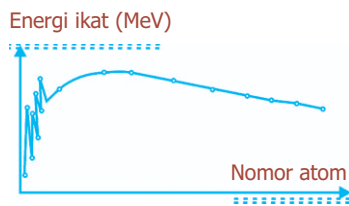
Berapakah kerapatan inti dari $^{16}_8\text{O}$?

Penyelesaian:

Dengan anggapan inti berbentuk bola, maka volumenya $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, sehingga:

$$\begin{aligned} R &= (1,2) \cdot A^{\frac{1}{3}} \text{ fm} \\ V &= \frac{4}{3}\pi \left(1,2 \times 10^{-15} \cdot A^{\frac{1}{3}} \right)^3 \\ &= \frac{4}{3}\pi (1,2)^3 \times 10^{-45} A \\ &= \frac{4}{3} (3,14) (1,2)^3 (10^{-45}) (16) \\ V &= 1,16 \times 10^{-43} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sehingga, } \rho &= \frac{m}{V} \\ &= \frac{(16 \text{ sma})(1,66056 \times 10^{-27} \text{ kg/sma})}{1,16 \times 10^{-43} \text{ m}^3} \\ &= 2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$



Gambar 11.3 Energi ikat per nukleon unsur-unsur dengan nomor atom.

4. Energi Ikat Inti dan Stabilitas Inti

Pada umumnya, inti yang memiliki nukleon yang lebih besar memiliki tingkat stabilitas inti yang rendah. Sehingga, tingkat stabilitas suatu inti ternyata tidak selalu ditentukan oleh besarnya energi ikat inti. Karena itu, besarnya energi yang berhubungan langsung dengan stabilitas inti adalah energi ikat per nukleon yang besarnya dapat dihitung melalui persamaan:

$$E_n = \frac{E}{A}$$

dengan:

E_n = energi ikat per nukleon (MeV)

E = energi ikat inti (MeV)

A = jumlah nukleon

5. Gaya Inti

Gaya Inti adalah gaya yang mengikat nukleon-nukleon, dengan kata lain gaya antarnukleon. Gaya Inti ternyata amat kuat tetapi jangkauannya amat pendek, dan tidak tergantung jenis nukleon, yaitu gaya antara proton dengan proton sama dengan gaya antara proton dengan neutron, maupun antara neutron dengan neutron. Ini berarti, bahwa gaya inti tidak bergantung pada muatan listrik nukleon (**charge independent**). Selanjutnya, ternyata gaya inti itu bersifat jenuh (*saturated*), yaitu setiap nukleon hanya tarik-menarik dengan nukleon di sekitarnya, seperti halnya gaya Van der Waals antarmolekul cairan. Sifat jenuh gaya inti ini diamati berdasarkan kejenuhan tenaga ikat per nukleon yang sekitar 8 MeV untuk semua unsur yang bilangan massanya A melebihi 60, seperti yang diperlihatkan oleh grafik pada Gambar 11.3.



Richard Feynman (1918 - 1988) mendapat hadiah Nobel pada tahun 1965 berkat karyanya mengenai gaya antara partikel dan radiasi elektromagnetik. Ia dianggap guru yang sangat cemerlang dan terkenal karena gurauannya yang praktis sederhana.

Contoh Soal

Massa atom $^{16}_8\text{O}$ adalah 15,995 sma; hidrogen 1,0078 sma; dan neutron 1,0087 sma. Tentukan:

- massa total partikel pembentuk,
- defek massa,
- energi ikat inti oksigen,
- energi ikat rata-rata per nukleon!

Penyelesaian:

Besaran yang diketahui:

$$\begin{array}{llll} m_i & = & 15,995 \text{ sma} & Z & = & 8 & \text{neutron} & = & A - Z \\ m_p & = & m_H = 1,0078 \text{ sma} & A & = & 16 & & = & 16 - 8 = 8 \\ m_n & = & 1,0087 \text{ sma} & & & & & & \end{array}$$

a. Massa total nukleon = massa total proton + massa total neutron

$$\begin{aligned} &= 8 m_p + 8 m_n \\ &= 8 (m_p + m_n) \\ &= 8 (1,0078 + 1,0087) \\ &= 16,132 \text{ sma} \end{aligned}$$

b. $m = Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_i$

$$\begin{aligned} &= 8 (1,0078) + (16 - 8) (1,0087) - 15,995 \\ &= 0,137 \text{ sma} \end{aligned}$$

c. $E = m (931 \text{ MeV/sma})$

$$\begin{aligned} &= (0,137 \text{ sma}) (931,5 \text{ MeV/sma}) \\ &= 127,62 \text{ MeV} \end{aligned}$$

d. $E_n = \frac{E}{A}$

$$\begin{aligned} &= \frac{127,62 \text{ MeV}}{16 \text{ nukleon}} \\ &= 7,97625 \text{ MeV/nukleon} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 11.1

- Jari-jari inti atom karbon adalah sekitar $3 \times 10^{-15} \text{ m}$ dan massanya adalah $12 u$.
 - Tentukan massa jenis rata-rata material nuklir!
 - Berapa kali lebih rapat daripada air?
- Atom ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ memiliki massa atom 59,930 sma. Jika diketahui massa proton, neutron, dan elektron masing-masing adalah 1,0073 sma; 1,0087 sma; dan 0,00054900 sma, tentukan defek massa dan energi ikat inti!



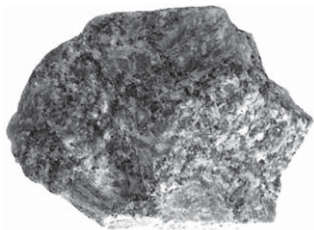
B. Radioaktivitas

Radioaktivitas disebut juga peluruhan radioaktif, yaitu peristiwa terurainya beberapa inti atom tertentu secara spontan yang diikuti dengan pancaran partikel alfa (inti helium), partikel beta (elektron), atau radiasi gamma (gelombang elektromagnetik gelombang pendek).



Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Gambar 11.4 Pierre Curie dan istrinya Marie Curie



Sumber: *Jendela Iptek Materi*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 11.5 Unsur uranium salah satu unsur radioaktif.

Sinar-sinar yang dipancarkan tersebut disebut **sinar radioaktif**, sedangkan zat yang memancarkan sinar radioaktif disebut dengan **zat radioaktif**.

Istilah keradioaktifan (*radioactivity*) pertama kali diciptakan oleh Marie Curie (1867 - 1934), seorang ahli kimia asal Prancis. Marie dan suaminya, Pierre Curie (1859 - 1906), berhasil menemukan unsur radioaktif baru, yaitu polonium dan radium. Ernest Rutherford (1871 - 1937) menyatakan bahwa sinar radioaktif dapat dibedakan atas sinar alfa yang bermuatan positif dan sinar beta yang bermuatan negatif. Paul Ulrich Villard (1869 - 1915), seorang ilmuwan Prancis, menemukan sinar radioaktif yang tidak bermuatan, yaitu sinar gamma.

1. Jenis Sinar Radioaktif

Berdasarkan partikel penyusunnya, sinar radioaktif dibagi menjadi tiga, yaitu sinar alfa, sinar beta, dan sinar gamma.

a. Sinar Alfa (Sinar α)

Sinar alfa adalah sinar yang dipancarkan oleh unsur radioaktif. Sinar ini ditemukan secara bersamaan dengan penemuan fenomena radioaktivitas, yaitu peluruhan inti atom yang berlangsung secara spontan, tidak terkontrol, dan menghasilkan radiasi. Sinar alfa terdiri atas dua proton dan dua neutron. Berikut ini adalah sifat alamiah sinar alfa.

- 1) Sinar alfa merupakan inti He.
- 2) Dapat menghitamkan pelat film (yang berarti memiliki daya ionisasi). Daya ionisasi sinar alfa paling kuat daripada sinar beta dan gamma.
- 3) Mempunyai daya tembus paling lemah di antara ketiga sinar radioaktif.
- 4) Dapat dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.
- 5) Mempunyai jangkauan beberapa sentimeter di udara dan 10^2 mm di dalam logam.

b. Sinar Beta (Sinar β)

Sinar beta merupakan elektron berenergi tinggi yang berasal dari inti atom. Berikut ini beberapa sifat alamiah sinar beta.

- 1) Mempunyai daya ionisasi yang lebih kecil dari sinar alfa.

- 2) Mempunyai daya tembus yang lebih besar daripada sinar alfa.
- 3) Dapat dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

c. Sinar Gamma (Sinar γ)

Sinar gamma adalah radiasi gelombang elektromagnetik yang terpancar dari inti atom dengan energi yang sangat tinggi yang tidak memiliki massa maupun muatan. Sinar gamma ikut terpancar ketika sebuah inti memancarkan sinar alfa dan sinar beta. Peluruhan sinar gamma tidak menyebabkan perubahan nomor atom maupun massa atom. Sinar gamma memiliki beberapa sifat alamiah berikut ini.

- 1) Sinar gamma tidak memiliki jangkauan maksimal di udara, semakin jauh dari sumber intensitasnya makin kecil.
- 2) Mempunyai daya ionisasi paling lemah.
- 3) Mempunyai daya tembus yang terbesar.
- 4) Tidak membelok dalam medan listrik maupun medan magnet.

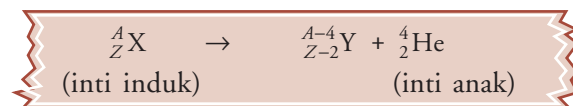
2. Peluruhan Radioaktif

a. Peluruhan Sinar Alfa

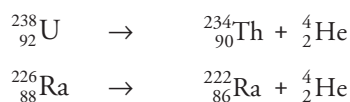
Suatu inti yang tidak stabil dapat meluruh menjadi inti yang lebih ringan dengan memancarkan partikel alfa (inti atom helium). Pada peluruhan alfa terjadi pembebasan energi. Energi yang dibebaskan akan menjadi energi kinetik partikel alfa dan inti anak. Inti anak memiliki energi ikat per nukleon yang lebih tinggi dibandingkan induknya.

Jika inti memancarkan sinar α (inti ${}^4_2\text{He}$), maka inti tersebut kehilangan 2 proton dan 2 neutron, sehingga Z berkurang 2, n berkurang 2, dan A berkurang 4.

Persamaan peluruhannya:



Contoh:



BETA β Berita Fisika

Ernest Rutherford menemukan bahwa partikel α adalah atom-atom helium tanpa elektron dan partikel α atau β keluar dari atom, jenis atom berubah. Perubahan demikian dapat menyebabkan radiasi γ .

Komet

Kolom mengingat

Peluruhan alfa menyebabkan nomor atom berkurang dua dan nomor massa berkurang empat, dan karena itu sebuah inti baru akan terbentuk. Adapun pada peluruhan beta akan menambah atau mengurangi nomor atom sebesar satu (nomor massa tetap sama).



Sumber: *Jendela Iptek Materi*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 11.6 Reaksi peluruhan unsur radioaktif.

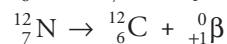
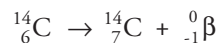
b. Peluruhan Sinar Beta

Salah satu bentuk peluruhan sinar beta adalah peluruhan neutron. Neutron akan meluruh menjadi proton, elektron, dan antineutrino. Antineutrino merupakan partikel netral yang mempunyai energi, tetapi tidak memiliki massa. Bentuk peluruhan sinar beta yang lain adalah peluruhan proton. Proton akan meluruh menjadi neutron, positron, dan neutrino. Neutrino memiliki sifat yang sama dengan antineutrino. Peluruhan sinar beta bertujuan agar perbandingan antara proton dan neutron di dalam inti atom menjadi seimbang sehingga inti atom tetap stabil.

Jika inti radioaktif memancarkan sinar beta (β) maka nomor massa inti tetap (jumlah nukleon tetap), tetapi nomor atom berubah. Terjadi dua proses peluruhan, yaitu:



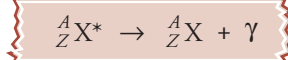
Contoh:



c. Peluruhan Gamma

Suatu inti atom yang berada dalam keadaan tereksitasi dapat kembali ke keadaan dasar (*ground state*) yang lebih stabil dengan memancarkan sinar gamma. Peristiwa ini dinamakan peluruhan sinar gamma. Atom yang tereksitasi biasanya terjadi pada atom yang memancarkan sinar alfa maupun sinar beta, karena pemancaran sinar gamma biasanya menyertai pemancaran sinar alfa dan sinar beta. Peluruhan gamma hanya mengurangi energi saja, tetapi tidak mengubah susunan inti.

Seperti dalam atom, inti atom dapat berada pada keadaan eksitasi, yaitu keadaan inti yang tingkat energinya lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Inti yang berada pada keadaan eksitasi diberi tanda *star* (*). Keadaan eksitasi inti ini dihasilkan dari tumbukan dengan partikel lain. Persamaan peluruhan sinar gamma:



Inti yang berada dalam keadaan eksitasi pada umumnya terjadi setelah peluruhan. Misalnya:



3. Deret Radioaktif

Deret radioaktif merupakan deret nuklida radioaktif. Pada deret ini setiap anggotanya terbentuk dari hasil peluruhan nuklida sebelumnya. Deret akan berakhir dengan nuklida stabil. Ada empat deret radioaktif alamiah, yaitu deret torium, neptunium, uranium, dan aktinium.

a. Deret Torium

Deret torium dimulai dari inti induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ dan berakhir pada inti ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Deret ini juga disebut dengan deret $4n$, sebab nomor massanya selalu kelipatan 4.

b. Deret Neptunium

Deret neptunium dimulai dari induk ${}^{237}_{93}\text{Np}$ dan berakhir pada inti ${}^{209}_{83}\text{Bi}$. Deret ini juga disebut deret $(4n + 1)$, karena nomor massanya selalu dapat dinyatakan dalam bentuk $4n + 1$.

c. Deret Uranium

Deret uranium dimulai dari inti induk ${}^{235}_{92}\text{U}$ dan berakhir pada ${}^{207}_{82}\text{Pb}$. Deret ini disebut juga deret $(4n + 2)$, karena nomor massanya selalu dapat dinyatakan dalam bentuk $4n + 2$.

d. Deret Aktinium

Deret aktinium dimulai dari inti induk U dan berakhir pada Pb. Deret ini juga disebut deret $(4n + 3)$, sebab nomor massanya selalu dapat dinyatakan dalam bentuk $4n + 3$.

4. Aktivitas Radioaktif

Aktivitas radioaktif didefinisikan sebagai jumlah atom suatu bahan radioaktif yang meluruh per satuan waktu. Dapat dirumuskan:

$$A = -\frac{dN}{dt} \dots\dots\dots (11.6)$$

Dengan N adalah jumlah inti radioaktif dan t adalah waktu peluruhan.

Berdasarkan eksperimen, menunjukkan bahwa jumlah inti atom radioisotop yang meluruh sebanding dengan selang waktu dt selama peluruhan, dengan tetapan kesebandingan λ , yang dinamakan tetapan radioaktif sebagai ukuran laju peluruhan, yang ternyata hanya tergantung pada jenis radioisotop, dan tidak tergantung keadaan sekitarnya, serta tidak dapat dipengaruhi oleh apapun.

Sehingga, peluruhan radioaktif dapat dituliskan dalam persamaan:

$$-\frac{dN}{N} = \lambda \cdot dt \dots\dots\dots (11.7)$$

Persamaan (11.7) dapat diselesaikan dengan persamaan integral, sehingga diperoleh:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (11.8a)$$

$$N_0 = \frac{N}{e^{-\lambda t}} \dots\dots\dots (11.8b)$$

Yang menunjukkan penurunan eksponensial terhadap waktu.

Satuan Radioaktivitas

Satuan radiasi ini merupakan satuan pengukuran yang digunakan untuk menyatakan aktivitas suatu radionuklida dan dosis radiasi ionisasi.

Satuan SI untuk radioaktivitas adalah becquerel (Bq), merupakan aktivitas sebuah radionuklida yang meluruh dengan laju rata-rata satu transisi nuklir spontan per sekon. Jadi,

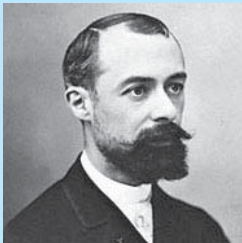
$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ peluruhan/sekon}$$

Satuan yang lama adalah curie (Ci), di mana 1 curie setara dengan $3,70 \times 10^{10}$ Bq, atau

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

5. Waktu Paruh

Waktu paruh adalah waktu yang diperlukan oleh zat radioaktif untuk berkurang menjadi separuh (setengah) dari jumlah semula. Dengan mengetahui waktu paruh suatu unsur radioaktif, dapat ditentukan jumlah unsur yang masih tersisa setelah selang waktu tertentu. Setiap unsur radioaktif mempunyai waktu paruh tertentu, misalnya karbon-14 ($C-14$) memiliki waktu paruh 5.730 tahun. Dari persamaan (11.8a) maka:



Henry Becquerel seorang ahli fisika dari Prancis. Atas jasanya di bidang radioaktivitas, namanya diabadikan sebagai satuan radioaktivitas.

untuk $t = T$ $N = \frac{1}{2} N_0$

sehingga, $\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

$$\lambda \cdot T = \ln 2$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$T = \frac{0,693}{\lambda} \dots\dots\dots (11.9)$$

Dari persamaan (11.9), maka dapat ditentukan jumlah inti radioaktif setelah peluruhan maupun aktivitas radioaktif setelah peluruhan melalui persamaan:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \dots\dots\dots (11.10)$$

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \dots\dots\dots (11.11)$$

Contoh Soal

- Inti $^{226}_{88}\text{Ra}$ memiliki waktu paruh $1,6 \times 10^3$ tahun. Jumlah inti 3×10^{16} . Berapakah aktivitas inti pada saat itu?

Penyelesaian:

Besaran yang diketahui: $N = 3 \times 10^{16}$

$$T = (1,6 \times 10^3 \text{ th})(3,16 \times 10^7 \text{ s/th})$$

$$T = 5,1 \times 10^{10} \text{ s}$$

sehingga:

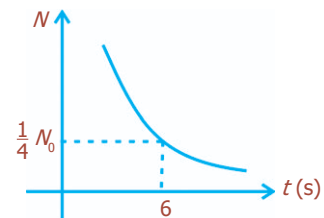
$$\lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{5,1 \times 10^{10} \text{ s}} = 0,14 \times 10^{-10} = 1,4 \times 10^{-11} / \text{s}$$

$$\begin{aligned} A &= \lambda \cdot N \\ &= (1,4 \times 10^{-11})(3 \times 10^{16}) \\ &= 4,2 \times 10^5 \text{ peluruhan/s} \end{aligned}$$

$$A = 4,2 \text{ Bq}$$

- Grafik di samping merupakan grafik peluruhan sampel radioaktif. Jika $N = \frac{1}{4} N_0 = 10^{20}$ inti, tentukan:
 - waktu paruh unsur radioaktif tersebut,
 - konstanta peluruhannya,
 - aktivitas radioaktif mula-mula!



Penyelesaian:

a. Dari data grafik:

$$N = \frac{1}{4} N_0 \text{ untuk } t = 6 \text{ s, sehingga:}$$

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

$$\frac{1}{4} N_0 = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{6}{T}}$$

$$2 = \frac{6}{T}$$

$$T = 3 \text{ sekon}$$

b. Konstanta peluruhan

$$\lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{3} = 0,231 \text{ peluruhan/sekon}$$

$$\begin{aligned} \text{c. } A &= \lambda \cdot N_0 \\ &= (0,231)(4 \times 10^{20}) \\ &= 0,924 \times 10^{20} \\ A &= 9,24 \times 10^{19} \text{ peluruhan/sekon} \\ A &= 9,24 \times 10^{19} \text{ Bq} \end{aligned}$$

Kegiatan

Tujuan : Melakukan percobaan simulasi waktu paruh.

Alat dan bahan : Kacang hijau, kotak kayu.

Cara Kerja:

1. Ambillah sebuah kotak dan lubangilah pada bagian dua sudut pada dasar kotak berurutan.
2. Dengan sudut ditutup, isilah kotak itu dengan sejumlah kacang hijau sampai hampir penuh.
3. Goyangkan kotak dan hitunglah kacang hijau yang keluar dari kotak.
4. Ulangilah langkah 3 sampai kacang hijau dalam kotak habis.
5. Jika jumlah kacang hijau yang keluar pada setiap goyangan dimisalkan N dan setiap kali goyangan adalah T , catatlah hasilnya dengan mengikuti format berikut ini.

Goyangan ke- (T)	Jumlah kacang yang Keluar (N)
1	
2	
3	
dst	

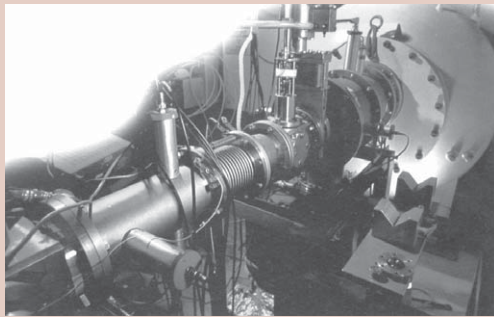
Diskusi:

1. Buatlah grafik hubungan N dan T !
2. Apakah yang dapat disimpulkan dari percobaan yang telah kalian lakukan?

Uji Kemampuan 11.2

1. Waktu paruh radium adalah $1,62 \times 10^3$ tahun dan berat atom radium adalah 226 kg/kmol. Berapa lama atom radium meluruh dalam 1 sekon pada 1 gram sampel radium?
2. Sebuah inti ^{239}Pu mengalami peluruhan alfa dengan waktu paruh selama $2,41 \times 10^4$ tahun. Hitunglah daya keluaran yang dapat diperoleh dari 2 gram inti tersebut!

Percikan Fisika



Mengungkap Umur Makhluk Hidup yang Pernah Ada

Karbon-14 meluruh menjadi karbon-12, namun ia terus-menerus terbentuk karena sinar kosmis membentur atom-atom nitrogen di atmosfer atas sehingga jumlahnya di udara tetap. Hal ini menyebabkan perbandingan karbon-14 dan karbon-12 tetap sepanjang hidup suatu makhluk hidup. Setelah mati, karbon-14 terus meluruh dan tidak tergantikan. Maka, perbandingan karbon-14 dan karbon-12 dapat mengungkapkan umur tumbuhan atau hewan yang pernah hidup sampai 40.000 tahun yang lalu. Spektrometer massa akselerator menghitung jumlah karbon-14 yang ada.

3. Bahaya Radiasi

Radiasi dapat menimbulkan kerusakan, yaitu perubahan yang membahayakan yang berlangsung pada benda mati dan makhluk hidup akibat paparan terhadap elektron berenergi, nukleon, fragmen fisi, atau radiasi elektromagnetik energi tinggi. Pada benda mati, kerusakan dapat disebabkan oleh eksitasi, ionisasi, perubahan elektronik, atau perpindahan atom. Pada makhluk hidup, mekanisme-mekanisme tersebut dapat mengakibatkan perubahan-perubahan pada sel yang mengganggu struktur genetiknya, keikutsertaan pada pembelahan sel, atau bahkan membunuh sel tersebut.

Hans Geiger memberi penghitung Geiger kepada James Chadwick pada tahun 1932 untuk mengukur tingkat radiasi. Jika partikel α atau β memasuki alat penghitung ini terjadinya letupan kecil arus listrik antara tabung dan kawat yang dideteksi oleh penghitung.

Pada manusia, perubahan-perubahan ini dapat menyebabkan penyakit radiasi, luka bakar akibat radiasi (akibat dosis tinggi radiasi), atau berbagai macam kerusakan jangka panjang. Akibat paling berbahaya adalah dapat menyebabkan berbagai jenis kanker. Kerusakan-kerusakan tersebut dapat terjadi karena radiasi dapat melewati atau menembus suatu benda. Jenis dan tingkat kerusakan tergantung pada beberapa faktor, antara lain jenis dari energi radiasi serta sifat dari medium. Sebagai contoh, logam yang dipergunakan di dalam reaktor. Strukturnya dapat menjadi lemah karena mendapat fluks neutron berenergi tinggi.

Dosis Serap

Suatu ukuran untuk menyatakan sejauh mana materi telah dikenai radiasi ionisasi disebut *dosis*. *Dosis Serap* menyatakan energi per satuan massa yang diserap oleh materi akibat radiasi tersebut. Besarnya dosis serap dapat dirumuskan:

$$D = \frac{E}{m} \dots\dots\dots (11.12)$$

Dengan D adalah dosis serap, E menyatakan besarnya energi yang diberikan oleh radiasi pengion, dan m adalah massa yang menyerap energi tersebut.

Dalam satuan SI, dosis serap dinyatakan dalam Gray (Gy), yaitu dosis terserap bila energi per satuan massa yang diberikan pada materi oleh radiasi ionisasi memiliki nilai 1 joule per kilogram. Satuan terdahulu adalah rad (rd), yang nilainya setara dengan 10^{-2} Gy.

Dosis maksimum yang diizinkan (*maximum permissible dose*) adalah batas atas dosis terserap yang boleh diterima manusia atau anggota tubuh dalam selang waktu tertentu, yang dianjurkan oleh Dewan Internasional untuk Perlindungan Radiologi (*International Commission on Radiological Protection*).

Contoh Soal

Seberkas partikel α melewati daging dan mengendapkan 0.2 J energi di dalam setiap kilogram daging. Tentukan dosisnya dalam Gy!

Penyelesaian:

Diketahui: $E = 0,2 \text{ J}$
 $m = 1 \text{ kg}$

Ditanya: $D = \dots?$

Jawab: $D = \frac{E}{m} = \frac{0,2}{1} = 0,2 \text{ Gy}$

Uji Kemampuan 11.3

Sebuah tumor pada kaki seseorang memiliki massa 3 gram. Berapakah energi yang dibutuhkan untuk dosis 8 Gy?



C. Reaksi Inti

Reaksi inti sangat berbeda dengan reaksi kimia, karena pada dasarnya reaksi inti ini terjadi karena tumbukan (penembakan) inti sasaran (target) dengan suatu proyektil (peluru). Secara skematik reaksi inti dapat digambarkan:



Pada reaksi inti ini terjadi perubahan unsur karena ditumbuk zarah nuklir atau zarah radioaktif yang dapat dinyatakan oleh persamaan reaksi:

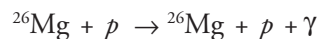
$$A + a \rightarrow B + b + Q \dots\dots\dots (11.13)$$

atau

$$A (a, b) B$$

dengan A adalah unsur semula, B adalah unsur yang terjadi, a dan b adalah zarah yang ditumbukkan dan yang terpental, dan Q adalah energi panas yang mungkin timbul dalam reaksi inti tersebut.

Apabila $b = a$, dan $B = A$, maka pada reaksi tersebut adalah hamburan. Misalnya:



dengan p adalah proton.

Dalam hal ini, hamburannya tidak elastis dengan energi kinetik proton yang terdisipasi untuk mengeksitasi inti Mg yang pada deeksitasinya mengeluarkan sinar gamma.

Pada reaksi inti berlaku hukum:

- kekekalan momentum linier dan momentum sudut,
- kekekalan energi,
- kekekalan jumlah muatan (nomor atom),
- kekekalan jumlah nukleon (nomor massa).

Dengan demikian, momentum, energi, nomor atom, dan nomor massa inti-inti sebelum reaksi harus sama dengan momentum, energi, nomor atom, dan nomor massa inti-inti setelah reaksi.



James Chadwick menemukan neutron dengan mendedahkan berillium logam ke partikel. Ia menemukan jenis partikel baru yang keluar dari intinya, yaitu neutron. Selanjutnya, dia meneliti deuterium (hidrogen berat). Isotop ini ditemukan pada tahun 1932 dan digunakan untuk reaktor nuklir.

Energi Reaksi Inti

Suatu reaksi inti bisa menghasilkan atau memerlukan energi. Besarnya energi Q bisa dihitung berdasarkan reaksi pada persamaan (11.13). Dalam perhitungan energi reaksi inti, semua massa inti dinyatakan dalam satuan sma (satuan massa atom). Menurut Einstein, energi total yang dimiliki suatu massa m adalah:

$$E = m \cdot c^2 \dots\dots\dots (11.14)$$

dengan c adalah kelajuan cahaya (3×10^8 m/s).

Dari persamaan (11.14) untuk 1 sma, energi yang dimiliki adalah 931,5 MeV. Dengan demikian, persamaan energi (berdasarkan hukum kekekalan energi) dapat dituliskan:

$$(m_A + m_a) \cdot 931,5 \text{ MeV} = (m_B + m_b) \cdot 931,5 \text{ MeV} + Q$$

atau

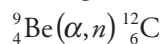
$$Q = \{(m_A + m_a) - (m_B + m_b)\} \cdot 931,5 \text{ MeV} \dots\dots\dots (11.15)$$

Dari persamaan (11.15), jika diperoleh nilai $Q > 0$, maka reaksinya disebut reaksi eksoterm, yaitu reaksi di mana terjadi pelepasan energi. Sebaliknya, jika $Q < 0$, maka reaksinya disebut reaksi endoterm, yaitu reaksi yang memerlukan energi.

Persamaan (11.15) menunjukkan bahwa pada prinsipnya, energi reaksi adalah sama dengan perubahan massa inti sebelum reaksi dan sesudah reaksi. Hal inilah yang dinyatakan Einstein sebagai kesetaraan massa-energi.

Contoh Soal

Hitunglah energi yang dibebaskan pada reaksi (1 sma = 931,5 MeV):



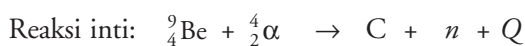
Jika $m_{\text{Be}} = 9,012$ sma,

$m_n = 1,008$ sma,

$m_\alpha = 4,002$ sma,

$m_c = 12,000$ sma!

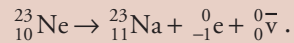
Penyelesaian:



$$\begin{aligned} Q &= \{(m_{\text{Be}} + m_\alpha) - (m_c + m_n)\} \times 931,5 \text{ MeV} \\ &= \{(9,012 + 4,002) - (12,000 + 1,008)\} \times 931,5 \text{ MeV} \\ &= \{13,014 - 13,008\} \times 931,5 \text{ MeV} \\ &= 0,006 \times 931,5 \text{ MeV} \\ Q &= 5,589 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 11.4

Neon-23 mengalami peluruhan beta dengan cara sebagai berikut:



Tentukan energi minimum dan maksimum yang dapat dimiliki partikel beta ${}_{-1}^0\text{e}$! Massa atom yang terkait adalah 22,9945 u untuk ${}^{23}\text{Ne}$; 22,9898 u untuk ${}^{23}\text{Na}$; dan massa partikel beta adalah 0,00055 u .

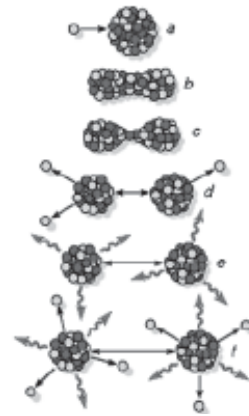
1. Reaksi Fisi

Reaksi fisi (pembelahan inti) adalah reaksi nuklir yang melibatkan pembelahan sebuah inti berat (seperti uranium) menjadi dua bagian (hasil fisi), yang kemudian memancarkan dua atau tiga neutron, sambil melepaskan sejumlah energi yang setara dengan selisih antara massa diam neutron dan hasil fisi dengan jumlah massa diam inti awal. Fisi dapat terjadi spontan atau sebagai akibat irradiasi neutron. Misalnya, fisi inti uranium-235 oleh sebuah neutron lambat akan berlangsung sebagai berikut:



Energi yang dilepaskan kira-kira 3×10^{-11} J per satu inti ${}^{235}\text{U}$. Untuk 1 kg ${}^{235}\text{U}$, energi yang dihasilkan setara dengan 20.000 megawatt.jam, sama dengan jumlah energi yang dihasilkan oleh pembakaran 3×10^6 ton batubara. Fisi nuklir n merupakan proses yang digunakan di dalam reaktor nuklir dan bom atom.

Pada suatu reaktor nuklir, reaksi fisi dapat dimanfaatkan sebagai pusat pembangkit tenaga listrik, karena reaksinya bisa dikendalikan. Sebaliknya, reaksi fisi yang tidak terkendali akan menghasilkan ledakan energi, seperti pada bom atom.

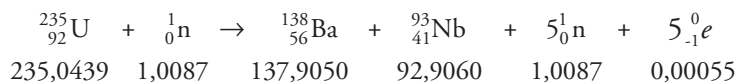


Sumber: *Encyclopedia Britannica*, 2005

Gambar 11.7 Reaksi fisi dari uranium.

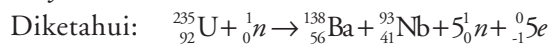
Contoh Soal

Perhatikan reaksi fisi berikut!



Hitunglah energi yang dibebaskan pada fisi 1 kg atom!

Penyelesaian:



$$m_{\text{u}} = 235,0439$$

$$m_{\text{Nb}} = 92,9060$$

$$m_{\text{n}} = 1,0087$$

$$m_{\text{e}} = 0,00055$$

$$m_{\text{Ba}} = 137,9050$$

Ditanya: Energi = ...?

Jawab:

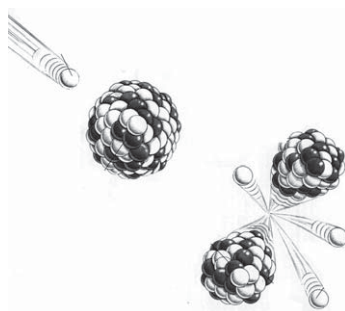
$$\begin{aligned}
 Q &= \{(m_u + m_n) - (m_{Ba} + m_{Nb} + 5m_n + 5m_e)\} \times 931 \text{ MeV/sma} \\
 &= \{(235,0439 + 1,0087) - (137,9050 + 92,9060 + \\
 &\quad (5 \times 1,0087) + (5 \times 0,00055))\} \times 931 \\
 &= 181,87085 \text{ MeV} \\
 1 \text{ kg atom} &= \frac{1}{1,66 \times 10^{-27}} \times \frac{181,87085}{235,0439} \\
 &= 4,66 \times 10^{26} \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 11.5

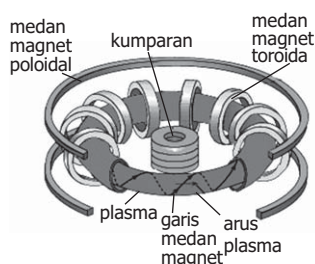
Ketika sebuah atom dari ^{235}U mengalami fisi di dalam sebuah reaktor, sekitar 200 MeV energi dilepaskan. Sebagai contoh, sebuah reaktor yang menggunakan uranium-235 menghasilkan output 700 MW dan efisiensi 20%. Berapa banyak atom uranium yang dikonsumsi dalam satu hari?

2. Reaksi Fusi

Reaksi fusi (penggabungan inti) adalah reaksi nuklir yang melibatkan penggabungan inti-inti atom dengan nomor atom kecil untuk membentuk inti yang lebih berat dengan melepaskan sejumlah besar energi. Dalam reaksi fisi, sebuah neutron dipergunakan untuk membelah sebuah inti yang besar, tetapi dalam reaksi fusi nuklir, dua inti yang bereaksi harus saling bertumbukan. Karena kedua inti bermuatan positif, maka timbul gaya tolak yang kuat antarinti, yang hanya dapat dilawan bila inti yang bereaksi memiliki energi kinetik yang sangat besar. Pada temperatur tinggi, reaksi fusi berlangsung sendiri, reaktan pada temperatur ini berada dalam bentuk plasma (dengan kata lain inti dan atom bebas) dan inti memiliki energi yang cukup untuk melawan gaya tolak elektrostatis. Bom fusi dan bintang-bintang menghasilkan energi dengan cara seperti ini. Diharapkan metode ini akan digunakan dalam reaktor termonuklir, sebagai sumber energi untuk kepentingan manusia. Berikut ini adalah contoh reaksi fusi yang terjadi pada bintang, matahari, serta pada atom hidrogen.

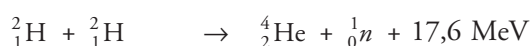
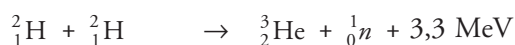
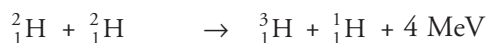


Gambar 11.8 Reaksi fusi uranium.



Sumber: *Encyclopedia Britannica*, 2005

Gambar 11.9 Tokamak reaktor fusi percobaan.



Contoh Soal

Reaksi fusi berikut ini berlangsung di Matahari dan menghasilkan sebagian besar energinya: $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{}^0_{+1}\text{e} + \text{energi}$.

Berapa besar energi yang dilepaskan ketika 1 kg hidrogen dikonsumsi? Massa ^1H adalah 1,007825 u; ^4He adalah 4,002604 u; dan $^0_{+1}\text{e}$ adalah 0,000549 u.

Penyelesaian:

Diketahui: $m_{\text{H}} = 1,007825 \text{ u}$ $m_{\text{e}} = 0,000549 \text{ u}$

$m_{\text{He}} = 4,002604 \text{ u}$

Ditanya: Energi = ...?

Jawab: $Q = \{(4m_{\text{H}}) - (m_{\text{He}}) + 2m_{\text{e}}\} \times 931 \text{ MeV/sma}$
 $= \{(4 \times 1,007825) - (4,002604 + (2 \times 0,000549))\} \times 931$
 $= 24,872596 \text{ MeV}$

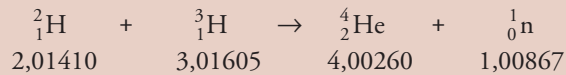
4 atom H = $4 \times 1,007825 = 4,0313 \text{ sma}$

Energi = $\frac{24,872596}{4,0313}$

1 kg $^1\text{H} = \frac{1}{1,66 \times 10^{-27}} \times \frac{24,872596}{4,0313}$
 $= 3,72 \times 10^{27} \text{ MeV}$

Uji Kemampuan 11.6

Salah satu reaksi fusi untuk pembangkit daya yang melibatkan ^2H dan ^3H :



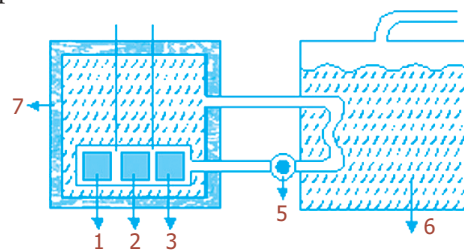
Berapakah energi yang dihasilkan jika 2 kg ^2H berfusi dengan 3 kg ^3H untuk membentuk ^4He ?



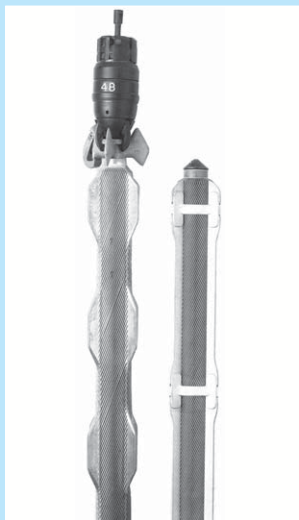
Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir merupakan sebuah peralatan sebagai tempat berlangsungnya reaksi berantai fisi nuklir terkendali untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop, atau nuklida baru.

1. Bahan bakar
2. Teras reaktor
3. Moderator
4. Batang kendali
5. Pompa pemindah
6. Generator uap
7. Shielding (perisai)



Gambar 11.10 Skema dasar reaktor.



Batangan bahan bakar ini digunakan untuk reaktor nuklir magnox. Batangan ini terbuat dari uranium alami, dibungkus magnox (aloi campuran magnesium).

Berikut ini beberapa komponen dasar reaktor.

1. Bahan bakar reaktor nuklir merupakan bahan yang akan menyebabkan suatu reaksi fisi berantai berlangsung sendiri, sebagai sumber energi nuklir. Isotop fisi adalah uranium-235, uranium-233, plutonium-239. Uranium-235 terdapat di alam (dengan perbandingan 1 : 40 pada uranium alam), dan yang lainnya harus dihasilkan secara buatan.
2. Teras reaktor, di dalamnya terdapat elemen bahan bakar yang membungkus bahan bakar.
3. Moderator adalah komponen reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat (± 2 MeV) menjadi komponen reaktor normal ($\pm 0,02 - 0,04$ eV) agar dapat bereaksi dengan bahan bakar nuklir. Selain itu, moderator juga berfungsi sebagai pendingin primer. Persyaratan yang diperlukan untuk bahan moderator yang baik adalah dapat menghilangkan sebagian besar energi neutron cepat tersebut dalam setiap tumbukan dan memiliki kemampuan yang kecil untuk menyerap neutron, serta memiliki kemampuan yang besar untuk menghamburkan neutron.

Bahan-bahan yang digunakan sebagai moderator, antara lain:

- a) air ringan (H_2O), c) grafit, dan
 - b) air berat (D_2O), d) berilium.
4. Setiap reaksi fisi menghasilkan neutron baru yang lebih banyak (2 - 3 neutron baru), maka perlu diatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar. Komponen reaktor yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron yang bereaksi dengan bahan bakar adalah batang kendali. Dalam reaktor dikenal faktor pengali (k), yaitu perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan setiap siklus dengan jumlah neutron pada awal siklus untuk:

$k = 1$, operasi reaktor dalam keadaan kritis,

$k > 1$, operasi reaktor dalam keadaan super kritis,

$k < 1$, operasi reaktor dalam keadaan subkritis.

Bahan yang dipergunakan untuk batang kendali reaktor haruslah memiliki kemampuan tinggi menyerap neutron. Bahan-bahan tersebut antara lain kadmium (Cd), boron (B), atau hafnium (Hf).

5. Perisai (shielding), berfungsi sebagai penahan radiasi hasil fisi bahan agar tidak menyebar pada lingkungan.

6. Pemindah panas, berfungsi untuk memindahkan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder dengan pompa pemindah panas.
7. Pendingin sekunder, dapat juga berfungsi sebagai generator uap (pembangkit uap) yang selanjutnya dapat digunakan untuk menggerakkan generator listrik.

Percikan Fisika

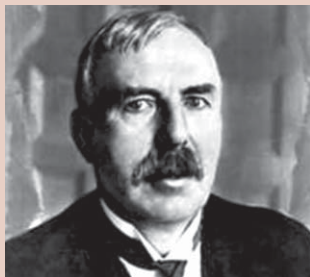


Pengawetan Makanan

Makanan, seperti buah-buahan, sayur-sayuran, dan daging dapat diiradiasi dengan sinar gamma. Radiasi memperlambat pemasakan buah-buahan, sayur-sayuran, dan membunuh bakteri-bakteri di dalam daging, sehingga memungkinkan makanan itu tetap segar untuk jangka waktu yang lebih lama.

Fiesta

Fisikawan Kita



Lord Ernest Rutherford (1871 - 1937)

Ahli fisika berkebangsaan Inggris. Ia lahir di Nelson, Selandia Baru. Ia seorang guru besar di Montreal, Manchester, dan Cambridge, merangkap ketua Cavendish Laboratory. Ia melakukan penyelidikan radioaktif, dan menyimpulkan bahwa partikel alfa bermuatan positif dan merupakan inti atom helium. Ia juga mengemukakan model atom dan meramalkan adanya neutron (partikel tidak bermuatan). Ia mendapatkan hadiah Nobel pada tahun 1908.

Kilas Balik

- * Secara umum inti atom dinotasikan: A_ZX

dengan: X = nama atom

Z = jumlah proton

- * Hubungan antara massa defek m dengan energi ikat inti E dinyatakan oleh:

$$E = m.c^2$$

Untuk m dalam sma dan E dalam MeV, persamaan di atas menjadi:

$$E = m (931,5 \text{ MeV/sma})$$

- * Energi ikat per nukleon E_n dinyatakan oleh: $E_n = \frac{E}{A}$.
- * Terdapat tiga sinar radioaktif yaitu sinar α , sinar β , dan sinar γ .
- * Deret radioaktif dibedakan menjadi empat, yaitu:
 - a. deret torium,
 - b. deret neptunium,
 - c. deret uranium,
 - d. deret aktinium.
- * Aktivitas radioaktif adalah laju perubahan inti radioaktif tiap satuan waktu yang dirumuskan:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Inti radioaktif atau aktivitas radioaktif meluruh secara eksponensial terhadap waktu.

$$N = N_0 e^{-\gamma t} \quad \text{dan} \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

- * Waktu paruh (T) adalah waktu yang diperlukan oleh inti radioaktif untuk meluruh hingga jumlah inti (N) maupun aktivitasnya (A) tinggal separuh atau setengah dari jumlah inti atau aktivitas mula-mula.

$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

Hubungan antara aktivitas radiasi (atau jumlah inti radioaktif) dengan selang waktu (t) serta waktu paruh (T), adalah:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad \text{atau} \quad A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

- * Dosis serap suatu materi dirumuskan: $D = \frac{E}{m}$.
- * Reaksi inti di mana inti induk A ditembak oleh partikel a menghasilkan inti anak B dan partikel b ditulis: $A + a \rightarrow B + b + Q$
 Sesuai kekekalan energi, maka:

$$Q = \{ (m_A + m_a) - (m_B + m_b) \} \times 931,5 \text{ MeV}$$
- * Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi dua inti yang lebih ringan disertai dengan pelepasan energi.
 Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti ringan membentuk inti yang lebih berat disertai dengan pembebasan energi.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Partikel penyusun inti atom adalah
- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| a. elektron dan proton | d. proton, neutron, dan elektron |
| b. proton dan neutron | e. ion positif dan ion negatif |
| c. neutron dan elektron | |

2. Berikut ini adalah sifat gaya inti, *kecuali*
 - a. tolak-menolak pada jangkauan pendek
 - b. tarik-menarik pada jarak jauh
 - c. tidak dipengaruhi muatan partikel
 - d. menyebabkan elektron jatuh ke inti
 - e. gaya terkuat dari gaya yang ada pada atom
3. Deret radioaktif alam yang nomor massanya dapat dinyatakan dalam bentuk $4n+1$ adalah
 - a. deret torium
 - b. deret neptunium
 - c. deret uranium
 - d. deret aktinium
 - e. deret plutonium
4. Apabila massa ${}^7_3\text{Li}$, ${}^1_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$ berturut-turut adalah 7,016 sma; 1,008 sma; 4,003 sma; serta 1 sma = 931,5 MeV. Maka energi yang timbul pada reaksi tersebut dalam satuan MeV adalah
 - a. 16,77
 - b. 23,24
 - c. 34,12
 - d. -17,34
 - e. -23,14
5. Reaksi inti berlangsung seperti persamaan berikut:

$$\alpha + {}^9_2\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + X$$
 X pada persamaan di atas adalah
 - a. ${}^1_1\text{H}$
 - b. ${}^2_1\text{H}$
 - c. 0_1e
 - d. ${}^0_{-1}e$
 - e. 1_0n
6. Urutan berdasarkan penurunan daya tembus pada sinar-sinar radioaktif adalah
 - a. alfa, beta, gamma
 - b. gamma, alfa, beta
 - c. beta, alfa, gamma
 - d. alfa, gamma, beta
 - e. gamma, beta, alfa
7. Suatu zat radioaktif meluruh dengan waktu paruh 20 hari. Agar zat radioaktif hanya tinggal $\frac{1}{8}$ bagian saja dari jumlah asalnya, maka diperlukan waktu peluruhan
 - a. 27,5 hari
 - b. 30 hari
 - c. 40 hari
 - d. 48 hari
 - e. 96 hari

8. Suatu bahan radioaktif memiliki konstanta peluruhan 1,386/hari. Bila aktivitas awalnya 400 Ci, maka aktivitasnya setelah dua hari adalah
 - a. 25 mCi
 - b. 50 mCi
 - c. 75 mCi
 - d. 100 mCi
 - e. 200 mCi
9. Reaksi berantai adalah
 - a. penggabungan proton dan neutron untuk membentuk inti atom
 - b. bergabungnya inti ringan untuk membentuk inti berat
 - c. pembelahan inti berat menjadi dua inti lebih ringan
 - d. pembelahan inti berat terus-menerus yang dipengaruhi oleh neutron-neutron yang dipancarkan oleh pembelahan inti berat lainnya
 - e. pembakaran uranium dalam suatu tungku khusus yang disebut reaktor atom
10. Proses ketika sebuah inti berat terpecahkan menjadi dua inti yang lebih ringan disertai pelepasan energi disebut
 - a. fisi
 - b. fusi
 - c. reaksi berantai
 - d. transmudasi
 - e. peluruhan

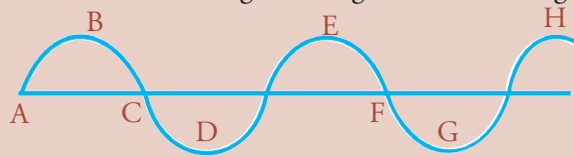
B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Hitunglah energi ikat per nukleon dari inti (Ne-20) jika $m_p + 1,007$ sma; $m_n + 1,008$ sma; $m_n = 20,000$ sma; dan $1 \text{ sma} = 931,5 \text{ MeV}$!
2. Sampel radioaktif memiliki waktu paruh 69,3 hari. Jika jumlah inti sampel pada saat itu $6,5 \times 10^{12}$ inti, hitunglah:
 - a. tetapan peluruhan dari sampel tersebut,
 - b. aktivitas sampel radioaktif saat itu!
3. Melalui radioaktivitas alami ^{238}U , memancarkan sebuah partikel α . Inti atom residu yang berat disebut UX_1 . UX_1 selanjutnya memancarkan partikel beta. Inti atom hasilnya disebut UX_2 . Tentukan nomor atom dan nomor massa untuk:
 - a. UX_1 dan
 - b. UX_2 !
4. Sebuah neutron cepat dalam sebuah reaktor memiliki energi 2 MeV. Agar neutron tersebut dapat bereaksi dengan bahan bakar U-235 dibutuhkan energi kira-kira 0,04 eV. Untuk itu, penurunan energinya bertumbukan dengan atom moderator. Jika tiap kali tumbukan energi berkurang setengahnya, maka tentukan jumlah tumbukan yang terjadi!
5. Bahan penyerap foton sinar α yang melaluinya sebesar 50%, energi tiap foton sinar γ adalah 2 MeV. Tebal bahan 2 cm dan luas daerah 1 mm^2 , serta massa jenis bahan 800 kg/m^3 . Jika dosis serap 50 MRd, hitunglah foton sinar γ tersebut!

Uji Kompetensi Semester 2

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Gelombang *tidak* dapat merambat di dalam medium
 a. udara
 b. air
 c. gas oksigen
 d. gas nitrogen
 e. ruang hampa
2. Berikut ini bentuk gelombang transversal sebagai fungsi dari kedudukan x .



Dua titik yang fasenya sama adalah

- a. A dan C
 - b. B dan D
 - c. E dan F
 - d. E dan H
 - e. G dan H
3. Gelombang longitudinal *tidak* menunjukkan adanya peristiwa
 a. pembiasan
 b. pemantulan
 c. difraksi
 d. dispersi
 e. polarisasi
 4. Suatu gelombang bunyi menjalar di udara dengan laju 340 m/s menyebabkan partikel-partikel di udara turut bergetar. Pada suatu posisi tertentu simpangan partikel udara pada saat t dinyatakan dengan:

$$y = 2 \times 10^{-6} \sin (100 \pi t + \phi) \text{ cm.}$$

- (1) amplitudo getaran adalah 2×10^{-6} cm,
- (2) frekuensi gelombang bunyi adalah 500 Hz,
- (3) panjang gelombang adalah 68 cm,
- (4) beda fase antara dua partikel udara yang jaraknya 34 cm adalah ϕ .

Pernyataan yang benar adalah

- a. (1), (2), dan (3)
 - b. (1) dan (3)
 - c. (2) dan (4)
 - d. (4)
 - e. (1), (2), (3), dan (4)
5. Laju gelombang transversal pada seutas tali yang panjangnya 25 m adalah 50 m/s. Apabila tegangan tali 200 N, maka massa tali itu adalah
 a. 0,08 kg
 b. 0,5 kg
 c. 0,8 kg
 d. 2,0 kg
 e. 12,5 kg

6. Suatu celah ganda berjarak celah 5 mm. Di belakang celah dengan jarak 2 m ditempatkan layar. Celah disinari dengan dua sinar monokromatik dengan panjang gelombang 600 nm dan 475 nm. Jarak pola difraksi orde keempat kedua sinar tersebut di layar adalah
 - a. 0,01 nm
 - b. 0,15 nm
 - c. 0,20 nm
 - d. 0,25 nm
 - e. 0,30 nm
7. Kelajuan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa adalah
 - a. tergantung pada frekuensinya
 - b. tergantung pada panjang gelombangnya
 - c. tergantung pada medan listriknya
 - d. tergantung pada medan listrik dan medan magnetnya
 - e. merupakan suatu tetapan umum
8. Jika sudut kritis permata di udara adalah $34,4^\circ$, maka sudut polarisasi permata adalah
 - a. $20,5^\circ$
 - b. $40,4^\circ$
 - c. $60,5^\circ$
 - d. $80,5^\circ$
 - e. $100,5^\circ$
9. Cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 660 nm datang tegak lurus mengenai sebuah kisi difraksi dan menghasilkan pola interferensi pada layar di belakangnya. Jika jarak antara pola tersebut adalah 6 mm, maka perlu digunakan cahaya monokromatik lain dengan panjang gelombang
 - a. 110 nm
 - b. 500 nm
 - c. 550 nm
 - d. 1.000 nm
 - e. 1.100 nm
10. Warna bunyi yang dihasilkan oleh sumber ditentukan oleh
 - a. tinggi nada
 - b. bentuk gelombang
 - c. amplitudo
 - d. frekuensi
 - e. nada-nada harmonik
11. Gelombang bunyi dengan frekuensi 256 Hz merambat di udara dengan kecepatan 330 m/s. Kecepatan rambat gelombang bunyi dengan frekuensi 512 Hz di udara adalah
 - a. 82,5 m/s
 - b. 165 m/s
 - c. 300 m/s
 - d. 660 m/s
 - e. 1.320 m/s
12. Pada percobaan Melde digunakan seutas benang yang panjangnya 2 m dan massanya 10 gram. Jika beban yang digunakan pada percobaan itu 200 gram ($g = 10 \text{ m/s}^2$), kecepatan gelombang transversal pada benang adalah
 - a. 5 m/s
 - b. 10 m/s
 - c. 15 m/s
 - d. 20 m/s
 - e. 24 m/s

13. Jika sebuah pipa organa terbuka ditiup hingga timbul nada atas kedua, maka terjadilah
 - a. 3 perut dan 3 simpul
 - b. 3 perut dan 4 simpul
 - c. 4 perut dan 3 simpul
 - d. 4 perut dan 4 simpul
 - e. 4 perut dan 5 simpul
14. Bila dua buah sumber bunyi masing-masing dengan frekuensi 2.000 Hz dan 2.008 Hz berbunyi dengan serentak, maka timbul pelayangan bunyi dengan frekuensi
 - a. 2 Hz
 - b. 4 Hz
 - c. 8 Hz
 - d. 2.004 Hz
 - e. 2.008 Hz
15. Suatu sumber bunyi bergerak dengan kecepatan 10 m/s menjauhi seorang pendengar yang tidak bergerak. Jika frekuensi bunyi 400 Hz dan kecepatan perambatannya 390 m/s, maka frekuensi gelombang bunyi yang terdengar adalah
 - a. 380 Hz
 - b. 390 Hz
 - c. 400 Hz
 - d. 410 Hz
 - e. 420 Hz
16. Taraf intensitas bunyi (*TI*) pada suatu jendela terbuka yang luasnya 1 m^2 adalah 60 dB. Jika harga ambang bunyi $10^{-16} \text{ watt/cm}^2$, maka daya akustik yang masuk melalui jendela tersebut adalah
 - a. 10^{-16} watt
 - b. 10^{-12} watt
 - c. 10^{-10} watt
 - d. 10^{-6} watt
 - e. 10^{-4} watt
17. Untuk memindahkan muatan positif yang besarnya 10 coulomb dari suatu titik yang potensialnya 10 volt ke suatu titik lain dengan potensial 60 volt diperlukan usaha sebesar
 - a. 5 volt/coulomb
 - b. 100 joule
 - c. 600 joule
 - d. 500 joule
 - e. 500 volt.ampere
18. Dua buah kutub magnet berada pada jarak 4 cm satu dengan lainnya. Kedua kutub itu kemudian saling dijauhkan hingga gaya tolak-menolaknya menjadi seperempat kalinya. Maka jarak antara kedua kutub itu sekarang adalah
 - a. 8 cm
 - b. 16 cm
 - c. 32 cm
 - d. 64 cm
 - e. 80 cm
19. Banyaknya garis gaya per satuan luas tegak lurus pada medan listrik menggambarkan besarnya
 - a. muatan listrik
 - b. rapat muatan listrik
 - c. potensial listrik
 - d. kuat medan listrik
 - e. medan listrik

20. Pada keempat sudut bujur sangkar (sisi 30 cm) terdapat muatan listrik. Potensial listrik di pusat bujur sangkar jika dua muatan yang bertetangga masing-masing $+2 \mu\text{C}$ dan yang lain $-2 \mu\text{C}$ adalah
- $3,4 \times 10^5$ volt
 - $-3,4 \times 10^5$ volt
 - $1,7 \times 10^5$
 - $-1,7 \times 10^5$
 - 0
21. Bola A dan B masing-masing bermuatan 10 C dan 30 C. Jarak kedua pusat bola 3 meter. Bila kedua bola terletak di udara, maka:
- energi potensial bola B = 9×10^{11} joule,
 - energi potensial bola A = 9×10^{11} joule,
 - energi potensial bola A = energi potensial B,
 - $\frac{\text{energi potensial B}}{\text{energi potensial A}} = 3$.
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)
22. Ada empat buah benda titik yang bermuatan yaitu A, B, C, dan D. Jika A menarik B, A menolak C, dan C menarik D, sedangkan D bermuatan negatif, maka ...
- muatan B positif, muatan C negatif
 - muatan B positif, muatan C positif
 - muatan B negatif, muatan C positif
 - muatan B negatif, muatan C negatif
 - muatan A positif, muatan C negatif
23. Dua keping logam yang sejajar dan jarak 0,5 cm satu dari yang lain diberi muatan listrik yang berlawanan hingga beda potensial 10.000 volt. Bila muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ C, maka besar dan arah gaya Coulomb pada sebuah elektron yang ada di antara kedua keping adalah
- $0,8 \times 10^{-17}$ N ke atas
 - $0,8 \times 10^{-17}$ N ke bawah
 - $3,2 \times 10^{-13}$ N, ke atas
 - $3,2 \times 10^{-13}$ N ke bawah
 - $12,5 \times 10^{24}$ ke atas
24. Dua partikel masing-masing bermuatan q_1 dan q_2 yang besar dan jenisnya tidak diketahui, terpisah sejauh d . Antara kedua muatan itu dan pada garis hubungannya terdapat titik P pada jarak $\frac{2}{3}d$ dari q_1 . Jika kuat medan di titik P sama dengan nol, maka
- q_1 dan q_2 adalah masing-masing muatan yang tidak sejenis
 - potensial di titik P yang disebabkan oleh q_1 dan q_2 sama
 - potensial di titik P sama dengan nol
 - besar muatan $q_1 = 2$ kali besar muatan q_2
 - besar muatan $q_1 = 4$ kali besar muatan q_2

25. Pada titik-titik sudut A, B, C, dan D sebuah bujur sangkar ABCD dengan panjang a berturut-turut ditempatkan muatan $+q, -q, -q, -q$. Muatan $+q$ mengalami resultan gaya dari muatan lain sebesar $\left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon a^2}\right)x$. Maka besar x adalah
- $\sqrt{2}$
 - $2+\sqrt{2}$
 - $\frac{1}{2}+\sqrt{2}$
 - $\frac{1}{\sqrt{2}}+\frac{1}{2}$
 - $\frac{1}{\sqrt{2}}$
26. Sebuah kapasitor terbentuk dari dua lempeng aluminium yang luas permukaannya masing-masing 1 m^2 , dipisahkan oleh selembur kertas parafin yang tebalnya $0,1 \text{ mm}$ dan konstanta dielektriknya 2. Jika $\epsilon_0 = 9 \times 10^{-12}$, maka kapasitas kapasitor ini
- $0,35 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,25 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,18 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,10 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,05 \text{ } \mu\text{F}$
27. Sebuah kapasitor diberi muatan 10 nC dan mempunyai beda potensial 100 V antara pelat-pelatnya. Kapasitansi dan tenaga yang tersimpan di dalamnya ...
- 100 pF dan $5 \times 10^{-5} \text{ J}$
 - 100 pF dan $5 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - 10 nF dan $6 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - 1 nF dan $5 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - 100 nF dan $2 \times 10^{-7} \text{ J}$
28. Sebuah kapasitor mempunyai kapasitas sebesar 5 mikrofarad. Bila udara di antara keping-kepingnya ditempatkan lembaran porselen, maka tetapan dielektrik porselen sama dengan
- 0,17
 - 6
 - 25
 - 35
 - 150
29. Tiga buah kapasitor masing-masing berkapasitas C . Dengan menghubungkan secara seri dan atau paralel, maka harga-harga kapasitas ganti yang mungkin adalah:
- $3C$
 - $\frac{2C}{3}$
 - $\frac{C}{3}$
 - $\frac{3C}{2}$
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)

30. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 farad, 6 farad, dan 9 farad dihubungkan secara seri. Kedua ujung dari gabungan tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan yang besarnya 220 volt. Tegangan antara ujung-ujung kapasitor 3 farad adalah
- 40 volt
 - 60 volt
 - 110 volt
 - 120 volt
 - 220 volt
31. Medan magnet dapat ditimbulkan oleh:
- (1) muatan listrik yang bergerak,
 - (2) konduktor yang dialiri arus searah,
 - (3) konduktor yang dialiri arus bolak-balik,
 - (4) muatan listrik yang tidak bergerak.
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)
32. Pada dua kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik yang sama besar, timbul gaya yang besarnya 2×10^{-7} N. Jarak antara kedua kawat itu 1 meter. Besar arus dalam setiap kawat adalah
- $\frac{1}{8}$ ampere
 - $\frac{1}{4}$ ampere
 - $\frac{1}{2}$ ampere
 - 1 ampere
 - 2 ampere
33. Suatu muatan listrik sebesar 0,20 C, bergerak dengan kecepatan 2 m/s dalam suatu medan magnet yang besarnya 5 weber/m². Jika arah kecepatan muatan itu sejajar dengan arah medan magnet, maka gaya yang dialami muatan itu sebesar
- 0
 - 0,08 newton
 - 0,5 newton
 - 2 newton
 - 50 newton
34. Sebuah solenoida yang cukup panjang (panjangnya l) terdiri atas N lilitan. Solenoida itu dialiri arus listrik I , sehingga membangkitkan induksi magnetik b di suatu titik di tengah solenoida. B ini dapat dinyatakan dengan
- $\frac{\mu_0 N I}{2l}$
 - $\frac{\mu_0 N I}{l}$
 - $\frac{\mu_0 N I}{2l}$
 - $\frac{\mu_0 N I}{l}$
 - $\mu_0 N I$

35. Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari l dialiri arus listrik I . Besar kuat medan magnet pada pusat lingkaran itu
- tidak tergantung pada I
 - sebanding dengan I^2
 - berbanding terbalik dengan I
 - berbanding lurus dengan I
 - berbanding terbalik dengan I^2
36. Suatu solenoida panjang 2 meter dengan 800 lilitan dan jari-jari 2 cm. Bila solenoida itu dialiri arus sebesar 0,5 A, maka induksi magnet pada ujung solenoida jika $\mu_0 = 2\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$ adalah
- $4\pi \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$
 - $\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/m}^2$
 - $4\pi \times 10^{-8} \text{ Wb/m}^2$
 - $4\pi \times 10^{-6} \text{ Wb/m}^2$
 - $2\pi \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$
37. Jika sebuah kawat digerakkan sedemikian hingga memotong garis-garis gaya suatu medan magnet, maka pada kedua ujung kawat itu timbul gaya gerak listrik karena induksi. Kaidah ini dirumuskan oleh
- Maxwell
 - Lenz
 - Foucault
 - Ampere
 - Faraday
38. Suatu kumparan terdiri atas 200 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan magnet sebesar 0,5 weber/m² dan diputar dengan kecepatan sudut 60 rad/s, maka pada ujung kumparan akan timbul ggl bolak-balik maksimum sebesar
- 5 volt
 - 30 volt
 - 60 volt
 - 110 volt
 - 20 volt
39. Sebuah resistor R dan sebuah kumparan L dihubungkan seri pada tegangan bolak-balik 110 volt. Tegangan antara kedua ujung kumparan dan resistor sama besar. Tegangan rangkaian tersebut adalah
- $25\sqrt{2} \text{ V}$
 - 50 V
 - $50\sqrt{2} \text{ V}$
 - $60\sqrt{2} \text{ V}$
 - 75 V
40. Hambatan 1.000 ohm, kumparan 0,5 henry, kapasitas 0,2 mikrofarad dirangkai seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik yang frekuensi angulernya 5.000 rad.s^{-1} . Harga impedansi rangkaian tersebut mendekati
- 100 ohm
 - 500 ohm
 - 1.800 ohm
 - 1.600 ohm
 - 2.600 ohm

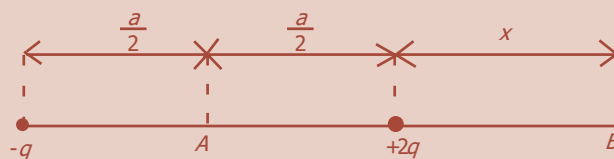
41. Sebuah partikel yang mempunyai massa m bergerak dengan kecepatan v . Jika tetapan Planck h , maka panjang gelombang partikel tersebut
- $\frac{m}{hv}$
 - $\frac{hv}{m}$
 - $\frac{hm}{v}$
 - mhv
 - $\frac{h}{mv}$
42. Berkas elektron berkecepatan $1,1 \times 10^6$ m/s. Jika massa elektron dan konstanta Planck masing-masing 9×10^{-31} kg dan $6,6 \times 10^{-34}$ Js, maka panjang gelombang berkas elektron tersebut adalah
- $8,2 \times 10^{-10}$ m
 - $4,8 \times 10^{-10}$ m
 - $5,0 \times 10^{-10}$ m
 - $5,2 \times 10^{-10}$ m
 - $6,6 \times 10^{-10}$ m
43. Jika konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34}$ Js, dan cepat rambat cahaya 3×10^8 m/s, maka sinar Na yang panjang gelombangnya 590 nm mempunyai energi sebesar
- 590 J
 - 3×10^{-9} J
 - 590×10^{-9} J
 - $3,36 \times 10^{-19}$ J
 - $6,63 \times 10^{-34}$ J
44. Sebuah benda hitam mempunyai suhu 2.000 K. Jika konstanta Hukum Pergeseran Wien $B = 2,898 \times 10^{-3}$ K, maka rapat energi maksimum yang dipancarkan benda itu terletak pada panjang gelombang sebesar
- $1,4 \mu\text{m}$
 - $2,9 \mu\text{m}$
 - $5,8 \mu\text{m}$
 - $7,3 \mu\text{m}$
 - $12,4 \mu\text{m}$
45. Sebuah keping logam yang mempunyai energi ambang 2 elektron.volt disinari dengan cahaya monokromatik panjang gelombang 6.000 Å hingga elektron meninggalkan permukaan logam. Jika $h = 6,6 \times 10^{-34}$ joule.sekon dan kecepatan cahaya 3×10^8 m/s, maka energi kinetik elektron yang lepas adalah
- $0,1 \times 10^{-19}$ joule
 - $0,16 \times 10^{-19}$ joule
 - $1,6 \times 10^{-19}$ joule
 - $3,2 \times 10^{-19}$ joule
 - $19,8 \times 10^{-19}$ joule
46. Besarnya energi ionisasi elektron ion Li^{2+} pada keadaan dasar adalah
- 1,51 eV
 - 13,6 eV
 - 40,8 eV
 - 54,5 eV
 - 122,4 eV
47. Jika atom H pada keadaan dasar menyerap foton yang berenergi 12,09 eV, elektronnya tereksitasi. Maka besar momentum sudut yang terbesar yang mungkin sebelum elektron tersebut kembali ke keadaan dasar adalah
- 0
 - $\hbar\sqrt{2}$ Js
 - $\hbar\sqrt{6}$ Js
 - $2\hbar\sqrt{3}$ Js
 - $2\hbar\sqrt{5}$ Js

48. Peristiwa terpecahnya satu garis spektrum menjadi beberapa garis spektrum ketika atom berada di dalam medan magnet adalah
- efek Zeemen
 - efek Compton
 - efek fotolistrik
 - efek Stern-Gerlach
 - efek Auger
49. Jika sebuah elektron dipercepat oleh beda potensial V , menumbuk sebuah atom He pada keadaan dasar sehingga salah satu elektronnya terionisasi, maka beda potensial V tersebut adalah
- 13,6 V
 - 13,6 V
 - 54,4 V
 - 54,4 V
 - 122,4 V
50. Arti dari notasi $3p^5$ adalah:
- (1) bilangan kuantum utama $n = 3$,
 - (2) bilangan kuantum orbital $l = 3$,
 - (3) jumlah elektron pada $n = 1$ adalah 2,
 - (4) energi yang dimiliki oleh elektron pada $1s$ adalah -13,6 eV.
- Pernyataan yang benar adalah
- (1),(2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)
51. Benda A berada di dalam mobil yang bergerak dengan kecepatan 30 m/s. B di tepi jalan. Kemudian, A melempar bola dengan laju 5 m/s berlawanan arah dengan gerak mobil. Maka kecepatan bola menurut B adalah
- 35 m/s
 - 35 m/s
 - 25 m/s
 - 25 m/s
 - 5 m/s
52. Sebuah mobil melaju dengan kecepatan 30 m/s. Dari dalam mobil tersebut dijatuhkan batu tanpa kecepatan awal. Empat sekon kemudian batu sampai di tanah. Maka kecepatan batu tersebut di tanah menurut orang yang berada di tanah adalah
- 50 m/s
 - 40 m/s
 - 30 m/s
 - 10 m/s
 - 5 m/s
53. Pengamat O mengamati sebuah lampu pada $x = 240$ m dan lampu tersebut padam pada $t = 5 \times 10^{-7}$ s. Maka posisi lampu tersebut (x') menurut O' yang bergerak dengan kecepatan $0,8 c$ relatif terhadap O dalam arah $x = x'$ adalah ...
- 200 m
 - 400 m
 - 600 m
 - 800 m
 - 1.200 m
54. Yang melakukan percobaan tentang pembuktian keberadaan eter adalah
- Michelson-Morley
 - Davisson-Germer
 - Geiger-Marsden
 - Biot-Savart
 - Geiger-Muller

55. Sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan $0,6 c$ terhadap pengamat di Bumi. Pengamat tersebut menyatakan bahwa panjang pesawat 40 m. Maka panjang pesawat tersebut diukur oleh pengamat di dalam pesawat tersebut adalah ...
- 2 m
 - 24 m
 - 50 m
 - 66,7 m
 - 80 m
56. Inti sebuah atom yang memancarkan sinar α maka
- massa atomnya tetap
 - massa atomnya bertambah 1
 - massa atomnya berkurang 4
 - massa atomnya bertambah 3
 - massa atomnya bertambah 2
57. Jika massa inti ${}^4_2\text{He} = 4,002 \text{ sma}$; massa proton = 1,0087 sma; dan $1 \text{ sma} = 930 \text{ MeV}$, maka energi ikat inti ${}^4_2\text{He}$ adalah
- 23 MeV
 - 23,44 MeV
 - 38,83 MeV
 - 43,44 MeV
 - 46,22 MeV
58. Suatu zat radioaktif meluruh dengan waktu paruh 20 hari. Agar zat radioaktif hanya tinggal $\frac{1}{8}$ bagian saja dari jumlah asalnya, maka diperlukan waktu peluruhan
- 27,5 hari
 - 30 hari
 - 40 hari
 - 60 hari
 - 160 hari
59. Proses di mana sebuah inti atom berat terpecah menjadi dua atom yang lebih ringan dikenal sebagai
- fisi
 - fusi
 - reaksi berantai
 - reaksi siklis
 - peluruhan
60. Pernyataan di bawah ini yang berkaitan dengan teori *big-bang* adalah
- materi di alam semesta dapat terbentuk terus-menerus
 - materi-materi di alam semesta akan mengkerut kembali sebagai akibat adanya gaya gravitasi
 - seluruh materi dan tenaga yang ada di alam ini berasal dari satu kesatuan berbentuk bola raksasa
 - semua materi di alam semesta ini tampaknya sama walaupun terjadi pergeseran galaksi-galaksi
 - segala sesuatu di alam semesta ini tampaknya sama walaupun terjadi pergeseran galaksi-galaksi

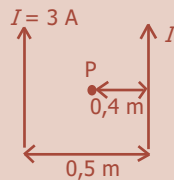
B. Jawablah dengan singkat dan jelas!

- Salah satu ujung seutas kawat digetarkan harmonik oleh tangki, sehingga getaran tersebut merambat ke kanan sepanjang kawat dengan cepat rambat 10 m/s. Ujung kawat mula-mula digetarkan ke atas dengan frekuensi 5 Hz dan amplitudo 0,01 m. Tentukan:
 - persamaan umum gelombang,
 - kecepatan dan percepatan partikel di titik $x = 0,25$ m pada saat ujung kawat telah bergetar 0,1 sekon,
 - sudut fase dan fase gelombang di titik $x = 0,25$ m pada saat ujung kawat telah bergetar 0,1 sekon,
 - beda fase antara titik dengan $x = 0,50$ m dan $x = 0,75$ m!
- Seberkas cahaya monokromatik dijatuhkan pada dua buah celah sempit vertikal yang berdekatan dengan jarak $d = 0,01$ m. Pola interferensi yang terjadi ditangkap pada jarak 20 cm dari celah. Diketahui bahwa jarak antara garis gelap pertama di sebelah kiri ke garis gelap pertama di sebelah kanan adalah 7,2 mm. Berapakah panjang gelombang berkas cahaya tersebut?
- Sebuah lokomotif yang mendekati sebuah bukit dengan kelajuan 40 km/jam membunyikan peluit dengan frekuensi 50 Hz ketika kereta berjarak 1 km dari bukit. Angin dengan kelajuan 40 km/jam bertiup searah gerak dengan kereta.
 - Tentukan frekuensi yang didengar oleh seorang pengamat di atas bukit jika cepat rambat bunyi di udara 1.200 km/jam!
 - Berapakah jarak dari bukit di mana gema dapat didengar oleh masinis kereta?
 - Berapa frekuensi bunyi yang didengar oleh masinis tersebut?
- Pada gambar berikut, dua muatan titik $-q$ dan $+2q$ terpisah sejauh a . Titik A berada di tengah-tengah garis penghubung kedua muatan tersebut dan titik B berada sejauh x dari muatan $+2q$. Agar potensial di titik A sama dengan potensial di titik B, tentukanlah nilai x !



- Sebuah kapasitor $50 \mu\text{F}$ dimuati oleh baterai 12 volt. Kapasitor diputuskan dari baterai dan jarak pisah antara kedua kepingnya dinaikkan dari 2 mm menjadi 3 mm.
 - Berapakah banyaknya muatan yang tersimpan dalam kapasitor?
 - Berapakah banyak energi yang mula-mula tersimpan dalam kapasitor?
 - Berapakah kenaikan energi ketika jarak pisah antara kedua kepingnya diubah?

6. Pada gambar di bawah ini ditunjukkan dua kawat lurus panjang dan sejajar. Kedua kawat dialiri arus 3 A dengan arah saling berlawanan. Tentukan besar induksi magnet di titik P!

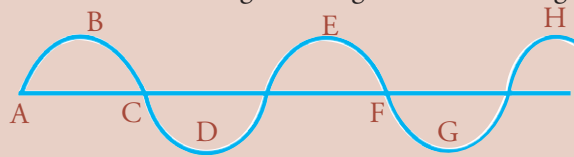


7. Sebuah kawat loop segi empat memiliki lebar 1 m, panjang 2 m, massa 1 kg, dan hambatan total 3 ohm. Loop ini dijatuhkan memotong tegak lurus suatu medan magnetik B . Dari pengamatan diperoleh bahwa kecepatan terminal loop (dicapai sebelum kawat bagian atas memasuki medan magnetik) adalah 2 m/s. Hitung besar induksi magnetik B !
8. Sebuah sumber arus sinusoidal AC memiliki frekuensi sudut 200 rad/s, dihubungkan ke ujung-ujung sebuah induktor murni 0,50 H.
- Jika tegangan sesaat AC dinyatakan oleh $v = (100 \sin \omega t)$ volt, dengan t dalam sekon, tentukanlah persamaan arus sesaat I !
 - Jika arus sesaat AC dinyatakan oleh $I = (2 \sin \omega t)$ A, dengan t dalam sekon, tentukanlah persamaan tegangan sesaat v pada ujung-ujung induktor!
9. Seberkas cahaya biru memiliki panjang gelombang 450 nm. Hitunglah energi cahaya biru tersebut jika terdiri atas:
- 1 foton,
 - 2 foton,
 - 3 foton!
10. Unsur Ba^{137} melepaskan foton sinar gamma 0,66 MeV dalam transisi internalnya. Berapakah energi kinetik pantulan atom tersebut?

Uji Kompetensi Semester 2

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Gelombang *tidak* dapat merambat di dalam medium
 a. udara
 b. air
 c. gas oksigen
 d. gas nitrogen
 e. ruang hampa
2. Berikut ini bentuk gelombang transversal sebagai fungsi dari kedudukan x .



Dua titik yang fasenya sama adalah

- a. A dan C
 - b. B dan D
 - c. E dan F
 - d. E dan H
 - e. G dan H
3. Gelombang longitudinal *tidak* menunjukkan adanya peristiwa
 a. pembiasan
 b. pemantulan
 c. difraksi
 d. dispersi
 e. polarisasi
 4. Suatu gelombang bunyi menjalar di udara dengan laju 340 m/s menyebabkan partikel-partikel di udara turut bergetar. Pada suatu posisi tertentu simpangan partikel udara pada saat t dinyatakan dengan:

$$y = 2 \times 10^{-6} \sin (100 \pi t + \phi) \text{ cm.}$$

- (1) amplitudo getaran adalah 2×10^{-6} cm,
- (2) frekuensi gelombang bunyi adalah 500 Hz,
- (3) panjang gelombang adalah 68 cm,
- (4) beda fase antara dua partikel udara yang jaraknya 34 cm adalah ϕ .

Pernyataan yang benar adalah

- a. (1), (2), dan (3)
 - b. (1) dan (3)
 - c. (2) dan (4)
 - d. (4)
 - e. (1), (2), (3), dan (4)
5. Laju gelombang transversal pada seutas tali yang panjangnya 25 m adalah 50 m/s. Apabila tegangan tali 200 N, maka massa tali itu adalah
 a. 0,08 kg
 b. 0,5 kg
 c. 0,8 kg
 d. 2,0 kg
 e. 12,5 kg

6. Suatu celah ganda berjarak celah 5 mm. Di belakang celah dengan jarak 2 m ditempatkan layar. Celah disinari dengan dua sinar monokromatik dengan panjang gelombang 600 nm dan 475 nm. Jarak pola difraksi orde keempat kedua sinar tersebut di layar adalah
 - a. 0,01 nm
 - b. 0,15 nm
 - c. 0,20 nm
 - d. 0,25 nm
 - e. 0,30 nm
7. Kelajuan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa adalah
 - a. tergantung pada frekuensinya
 - b. tergantung pada panjang gelombangnya
 - c. tergantung pada medan listriknya
 - d. tergantung pada medan listrik dan medan magnetnya
 - e. merupakan suatu tetapan umum
8. Jika sudut kritis permata di udara adalah $34,4^\circ$, maka sudut polarisasi permata adalah
 - a. $20,5^\circ$
 - b. $40,4^\circ$
 - c. $60,5^\circ$
 - d. $80,5^\circ$
 - e. $100,5^\circ$
9. Cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 660 nm datang tegak lurus mengenai sebuah kisi difraksi dan menghasilkan pola interferensi pada layar di belakangnya. Jika jarak antara pola tersebut adalah 6 mm, maka perlu digunakan cahaya monokromatik lain dengan panjang gelombang
 - a. 110 nm
 - b. 500 nm
 - c. 550 nm
 - d. 1.000 nm
 - e. 1.100 nm
10. Warna bunyi yang dihasilkan oleh sumber ditentukan oleh
 - a. tinggi nada
 - b. bentuk gelombang
 - c. amplitudo
 - d. frekuensi
 - e. nada-nada harmonik
11. Gelombang bunyi dengan frekuensi 256 Hz merambat di udara dengan kecepatan 330 m/s. Kecepatan rambat gelombang bunyi dengan frekuensi 512 Hz di udara adalah
 - a. 82,5 m/s
 - b. 165 m/s
 - c. 300 m/s
 - d. 660 m/s
 - e. 1.320 m/s
12. Pada percobaan Melde digunakan seutas benang yang panjangnya 2 m dan massanya 10 gram. Jika beban yang digunakan pada percobaan itu 200 gram ($g = 10 \text{ m/s}^2$), kecepatan gelombang transversal pada benang adalah
 - a. 5 m/s
 - b. 10 m/s
 - c. 15 m/s
 - d. 20 m/s
 - e. 24 m/s

13. Jika sebuah pipa organa terbuka ditiup hingga timbul nada atas kedua, maka terjadilah
- 3 perut dan 3 simpul
 - 3 perut dan 4 simpul
 - 4 perut dan 3 simpul
 - 4 perut dan 4 simpul
 - 4 perut dan 5 simpul
14. Bila dua buah sumber bunyi masing-masing dengan frekuensi 2.000 Hz dan 2.008 Hz berbunyi dengan serentak, maka timbul pelayangan bunyi dengan frekuensi
- 2 Hz
 - 4 Hz
 - 8 Hz
 - 2.004 Hz
 - 2.008 Hz
15. Suatu sumber bunyi bergerak dengan kecepatan 10 m/s menjauhi seorang pendengar yang tidak bergerak. Jika frekuensi bunyi 400 Hz dan kecepatan perambatannya 390 m/s, maka frekuensi gelombang bunyi yang terdengar adalah
- 380 Hz
 - 390 Hz
 - 400 Hz
 - 410 Hz
 - 420 Hz
16. Taraf intensitas bunyi (TI) pada suatu jendela terbuka yang luasnya 1 m^2 adalah 60 dB. Jika harga ambang bunyi $10^{-16} \text{ watt/cm}^2$, maka daya akustik yang masuk melalui jendela tersebut adalah
- 10^{-16} watt
 - 10^{-12} watt
 - 10^{-10} watt
 - 10^{-6} watt
 - 10^{-4} watt
17. Untuk memindahkan muatan positif yang besarnya 10 coulomb dari suatu titik yang potensialnya 10 volt ke suatu titik lain dengan potensial 60 volt diperlukan usaha sebesar
- 5 volt/coulomb
 - 100 joule
 - 600 joule
 - 500 joule
 - 500 volt.ampere
18. Dua buah kutub magnet berada pada jarak 4 cm satu dengan lainnya. Kedua kutub itu kemudian saling dijauhkan hingga gaya tolak-menolaknya menjadi seperempat kalinya. Maka jarak antara kedua kutub itu sekarang adalah
- 8 cm
 - 16 cm
 - 32 cm
 - 64 cm
 - 80 cm
19. Banyaknya garis gaya per satuan luas tegak lurus pada medan listrik menggambarkan besarnya
- muatan listrik
 - rapat muatan listrik
 - potensial listrik
 - kuat medan listrik
 - medan listrik

20. Pada keempat sudut bujur sangkar (sisi 30 cm) terdapat muatan listrik. Potensial listrik di pusat bujur sangkar jika dua muatan yang bertetangga masing-masing $+2 \mu\text{C}$ dan yang lain $-2 \mu\text{C}$ adalah
- $3,4 \times 10^5$ volt
 - $-3,4 \times 10^5$ volt
 - $1,7 \times 10^5$
 - $-1,7 \times 10^5$
 - 0
21. Bola A dan B masing-masing bermuatan 10 C dan 30 C. Jarak kedua pusat bola 3 meter. Bila kedua bola terletak di udara, maka:
- energi potensial bola B = 9×10^{11} joule,
 - energi potensial bola A = 9×10^{11} joule,
 - energi potensial bola A = energi potensial B,
 - $\frac{\text{energi potensial B}}{\text{energi potensial A}} = 3$.
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)
22. Ada empat buah benda titik yang bermuatan yaitu A, B, C, dan D. Jika A menarik B, A menolak C, dan C menarik D, sedangkan D bermuatan negatif, maka ...
- muatan B positif, muatan C negatif
 - muatan B positif, muatan C positif
 - muatan B negatif, muatan C positif
 - muatan B negatif, muatan C negatif
 - muatan A positif, muatan C negatif
23. Dua keping logam yang sejajar dan jarak 0,5 cm satu dari yang lain diberi muatan listrik yang berlawanan hingga beda potensial 10.000 volt. Bila muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ C, maka besar dan arah gaya Coulomb pada sebuah elektron yang ada di antara kedua keping adalah
- $0,8 \times 10^{-17}$ N ke atas
 - $0,8 \times 10^{-17}$ N ke bawah
 - $3,2 \times 10^{-13}$ N, ke atas
 - $3,2 \times 10^{-13}$ N ke bawah
 - $12,5 \times 10^{24}$ ke atas
24. Dua partikel masing-masing bermuatan q_1 dan q_2 yang besar dan jenisnya tidak diketahui, terpisah sejauh d . Antara kedua muatan itu dan pada garis hubungannya terdapat titik P pada jarak $\frac{2}{3}d$ dari q_1 . Jika kuat medan di titik P sama dengan nol, maka
- q_1 dan q_2 adalah masing-masing muatan yang tidak sejenis
 - potensial di titik P yang disebabkan oleh q_1 dan q_2 sama
 - potensial di titik P sama dengan nol
 - besar muatan $q_1 = 2$ kali besar muatan q_2
 - besar muatan $q_1 = 4$ kali besar muatan q_2

25. Pada titik-titik sudut A, B, C, dan D sebuah bujur sangkar ABCD dengan panjang a berturut-turut ditempatkan muatan $+q, -q, -q, -q$. Muatan $+q$ mengalami resultan gaya dari muatan lain sebesar $\left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon a^2}\right)x$. Maka besar x adalah
- $\sqrt{2}$
 - $2+\sqrt{2}$
 - $\frac{1}{2}+\sqrt{2}$
 - $\frac{1}{\sqrt{2}}+\frac{1}{2}$
 - $\frac{1}{\sqrt{2}}$
26. Sebuah kapasitor terbentuk dari dua lempeng aluminium yang luas permukaannya masing-masing 1 m^2 , dipisahkan oleh selembur kertas parafin yang tebalnya $0,1 \text{ mm}$ dan konstanta dielektriknya 2. Jika $\epsilon_0 = 9 \times 10^{-12}$, maka kapasitas kapasitor ini
- $0,35 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,25 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,18 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,10 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,05 \text{ } \mu\text{F}$
27. Sebuah kapasitor diberi muatan 10 nC dan mempunyai beda potensial 100 V antara pelat-pelatnya. Kapasitansi dan tenaga yang tersimpan di dalamnya ...
- 100 pF dan $5 \times 10^{-5} \text{ J}$
 - 100 pF dan $5 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - 10 nF dan $6 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - 1 nF dan $5 \times 10^{-7} \text{ J}$
 - 100 nF dan $2 \times 10^{-7} \text{ J}$
28. Sebuah kapasitor mempunyai kapasitas sebesar 5 mikrofarad. Bila udara di antara keping-kepingnya ditempatkan lembaran porselen, maka tetapan dielektrik porselen sama dengan
- 0,17
 - 6
 - 25
 - 35
 - 150
29. Tiga buah kapasitor masing-masing berkapasitas C . Dengan menghubungkan secara seri dan atau paralel, maka harga-harga kapasitas ganti yang mungkin adalah:
- $3C$
 - $\frac{2C}{3}$
 - $\frac{C}{3}$
 - $\frac{3C}{2}$
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)

30. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 farad, 6 farad, dan 9 farad dihubungkan secara seri. Kedua ujung dari gabungan tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan yang besarnya 220 volt. Tegangan antara ujung-ujung kapasitor 3 farad adalah
- 40 volt
 - 60 volt
 - 110 volt
 - 120 volt
 - 220 volt
31. Medan magnet dapat ditimbulkan oleh:
- (1) muatan listrik yang bergerak,
 - (2) konduktor yang dialiri arus searah,
 - (3) konduktor yang dialiri arus bolak-balik,
 - (4) muatan listrik yang tidak bergerak.
- Pernyataan yang benar adalah
- (1), (2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)
32. Pada dua kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik yang sama besar, timbul gaya yang besarnya 2×10^{-7} N. Jarak antara kedua kawat itu 1 meter. Besar arus dalam setiap kawat adalah
- $\frac{1}{8}$ ampere
 - $\frac{1}{4}$ ampere
 - $\frac{1}{2}$ ampere
 - 1 ampere
 - 2 ampere
33. Suatu muatan listrik sebesar 0,20 C, bergerak dengan kecepatan 2 m/s dalam suatu medan magnet yang besarnya 5 weber/m². Jika arah kecepatan muatan itu sejajar dengan arah medan magnet, maka gaya yang dialami muatan itu sebesar
- 0
 - 0,08 newton
 - 0,5 newton
 - 2 newton
 - 50 newton
34. Sebuah solenoida yang cukup panjang (panjangnya l) terdiri atas N lilitan. Solenoida itu dialiri arus listrik I , sehingga membangkitkan induksi magnetik b di suatu titik di tengah solenoida. B ini dapat dinyatakan dengan
- $\frac{\mu_0 N I}{2l}$
 - $\frac{\mu_0 N I}{l}$
 - $\frac{\mu_0 N I}{2l}$
 - $\frac{\mu_0 N I}{l}$
 - $\mu_0 N I$

35. Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari l dialiri arus listrik I . Besar kuat medan magnet pada pusat lingkaran itu
- tidak tergantung pada I
 - sebanding dengan I^2
 - berbanding terbalik dengan I
 - berbanding lurus dengan I
 - berbanding terbalik dengan I^2
36. Suatu solenoida panjang 2 meter dengan 800 lilitan dan jari-jari 2 cm. Bila solenoida itu dialiri arus sebesar 0,5 A, maka induksi magnet pada ujung solenoida jika $\mu_0 = 2\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$ adalah
- $4\pi \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$
 - $\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/m}^2$
 - $4\pi \times 10^{-8} \text{ Wb/m}^2$
 - $4\pi \times 10^{-6} \text{ Wb/m}^2$
 - $2\pi \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$
37. Jika sebuah kawat digerakkan sedemikian hingga memotong garis-garis gaya suatu medan magnet, maka pada kedua ujung kawat itu timbul gaya gerak listrik karena induksi. Kaidah ini dirumuskan oleh
- Maxwell
 - Lenz
 - Foucault
 - Ampere
 - Faraday
38. Suatu kumparan terdiri atas 200 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan magnet sebesar 0,5 weber/m² dan diputar dengan kecepatan sudut 60 rad/s, maka pada ujung kumparan akan timbul ggl bolak-balik maksimum sebesar
- 5 volt
 - 30 volt
 - 60 volt
 - 110 volt
 - 20 volt
39. Sebuah resistor R dan sebuah kumparan L dihubungkan seri pada tegangan bolak-balik 110 volt. Tegangan antara kedua ujung kumparan dan resistor sama besar. Tegangan rangkaian tersebut adalah
- $25\sqrt{2} \text{ V}$
 - 50 V
 - $50\sqrt{2} \text{ V}$
 - $60\sqrt{2} \text{ V}$
 - 75 V
40. Hambatan 1.000 ohm, kumparan 0,5 henry, kapasitas 0,2 mikrofarad dirangkai seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik yang frekuensi angulernya 5.000 rad.s^{-1} . Harga impedansi rangkaian tersebut mendekati
- 100 ohm
 - 500 ohm
 - 1.800 ohm
 - 1.600 ohm
 - 2.600 ohm

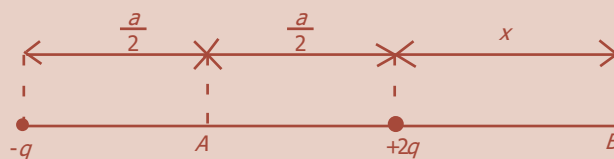
41. Sebuah partikel yang mempunyai massa m bergerak dengan kecepatan v . Jika tetapan Planck h , maka panjang gelombang partikel tersebut
- $\frac{m}{hv}$
 - $\frac{hv}{m}$
 - $\frac{hm}{v}$
 - mhv
 - $\frac{h}{mv}$
42. Berkas elektron berkecepatan $1,1 \times 10^6$ m/s. Jika massa elektron dan konstanta Planck masing-masing 9×10^{-31} kg dan $6,6 \times 10^{-34}$ Js, maka panjang gelombang berkas elektron tersebut adalah
- $8,2 \times 10^{-10}$ m
 - $4,8 \times 10^{-10}$ m
 - $5,0 \times 10^{-10}$ m
 - $5,2 \times 10^{-10}$ m
 - $6,6 \times 10^{-10}$ m
43. Jika konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34}$ Js, dan cepat rambat cahaya 3×10^8 m/s, maka sinar Na yang panjang gelombangnya 590 nm mempunyai energi sebesar
- 590 J
 - 3×10^{-9} J
 - 590×10^{-9} J
 - $3,36 \times 10^{-19}$ J
 - $6,63 \times 10^{-34}$ J
44. Sebuah benda hitam mempunyai suhu 2.000 K. Jika konstanta Hukum Pergeseran Wien $B = 2,898 \times 10^{-3}$ K, maka rapat energi maksimum yang dipancarkan benda itu terletak pada panjang gelombang sebesar
- $1,4 \mu\text{m}$
 - $2,9 \mu\text{m}$
 - $5,8 \mu\text{m}$
 - $7,3 \mu\text{m}$
 - $12,4 \mu\text{m}$
45. Sebuah keping logam yang mempunyai energi ambang 2 elektron.volt disinari dengan cahaya monokromatik panjang gelombang 6.000 Å hingga elektron meninggalkan permukaan logam. Jika $h = 6,6 \times 10^{-34}$ joule.sekon dan kecepatan cahaya 3×10^8 m/s, maka energi kinetik elektron yang lepas adalah
- $0,1 \times 10^{-19}$ joule
 - $0,16 \times 10^{-19}$ joule
 - $1,6 \times 10^{-19}$ joule
 - $3,2 \times 10^{-19}$ joule
 - $19,8 \times 10^{-19}$ joule
46. Besarnya energi ionisasi elektron ion Li^{2+} pada keadaan dasar adalah
- 1,51 eV
 - 13,6 eV
 - 40,8 eV
 - 54,5 eV
 - 122,4 eV
47. Jika atom H pada keadaan dasar menyerap foton yang berenergi 12,09 eV, elektronnya tereksitasi. Maka besar momentum sudut yang terbesar yang mungkin sebelum elektron tersebut kembali ke keadaan dasar adalah
- 0
 - $\hbar\sqrt{2}$ Js
 - $\hbar\sqrt{6}$ Js
 - $2\hbar\sqrt{3}$ Js
 - $2\hbar\sqrt{5}$ Js

48. Peristiwa terpecahnya satu garis spektrum menjadi beberapa garis spektrum ketika atom berada di dalam medan magnet adalah
- efek Zeemen
 - efek Compton
 - efek fotolistrik
 - efek Stern-Gerlach
 - efek Auger
49. Jika sebuah elektron dipercepat oleh beda potensial V , menumbuk sebuah atom He pada keadaan dasar sehingga salah satu elektronnya terionisasi, maka beda potensial V tersebut adalah
- 13,6 V
 - 13,6 V
 - 54,4 V
 - 54,4 V
 - 122,4 V
50. Arti dari notasi $3p^5$ adalah:
- (1) bilangan kuantum utama $n = 3$,
 - (2) bilangan kuantum orbital $l = 3$,
 - (3) jumlah elektron pada $n = 1$ adalah 2,
 - (4) energi yang dimiliki oleh elektron pada $1s$ adalah -13,6 eV.
- Pernyataan yang benar adalah
- (1),(2), dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4)
 - (4)
 - (1), (2), (3), dan (4)
51. Benda A berada di dalam mobil yang bergerak dengan kecepatan 30 m/s. B di tepi jalan. Kemudian, A melempar bola dengan laju 5 m/s berlawanan arah dengan gerak mobil. Maka kecepatan bola menurut B adalah
- 35 m/s
 - 35 m/s
 - 25 m/s
 - 25 m/s
 - 5 m/s
52. Sebuah mobil melaju dengan kecepatan 30 m/s. Dari dalam mobil tersebut dijatuhkan batu tanpa kecepatan awal. Empat sekon kemudian batu sampai di tanah. Maka kecepatan batu tersebut di tanah menurut orang yang berada di tanah adalah
- 50 m/s
 - 40 m/s
 - 30 m/s
 - 10 m/s
 - 5 m/s
53. Pengamat O mengamati sebuah lampu pada $x = 240$ m dan lampu tersebut padam pada $t = 5 \times 10^{-7}$ s. Maka posisi lampu tersebut (x') menurut O' yang bergerak dengan kecepatan $0,8 c$ relatif terhadap O dalam arah $x = x'$ adalah ...
- 200 m
 - 400 m
 - 600 m
 - 800 m
 - 1.200 m
54. Yang melakukan percobaan tentang pembuktian keberadaan eter adalah
- Michelson-Morley
 - Davisson-Germer
 - Geiger-Marsden
 - Biot-Savart
 - Geiger-Muller

55. Sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan $0,6 c$ terhadap pengamat di Bumi. Pengamat tersebut menyatakan bahwa panjang pesawat 40 m. Maka panjang pesawat tersebut diukur oleh pengamat di dalam pesawat tersebut adalah ...
- 2 m
 - 24 m
 - 50 m
 - 66,7 m
 - 80 m
56. Inti sebuah atom yang memancarkan sinar α maka
- massa atomnya tetap
 - massa atomnya bertambah 1
 - massa atomnya berkurang 4
 - massa atomnya bertambah 3
 - massa atomnya bertambah 2
57. Jika massa inti ${}^4_2\text{He} = 4,002 \text{ sma}$; massa proton = 1,0087 sma; dan $1 \text{ sma} = 930 \text{ MeV}$, maka energi ikat inti ${}^4_2\text{He}$ adalah
- 23 MeV
 - 23,44 MeV
 - 38,83 MeV
 - 43,44 MeV
 - 46,22 MeV
58. Suatu zat radioaktif meluruh dengan waktu paruh 20 hari. Agar zat radioaktif hanya tinggal $\frac{1}{8}$ bagian saja dari jumlah asalnya, maka diperlukan waktu peluruhan
- 27,5 hari
 - 30 hari
 - 40 hari
 - 60 hari
 - 160 hari
59. Proses di mana sebuah inti atom berat terpecah menjadi dua atom yang lebih ringan dikenal sebagai
- fisi
 - fusi
 - reaksi berantai
 - reaksi siklis
 - peluruhan
60. Pernyataan di bawah ini yang berkaitan dengan teori *big-bang* adalah
- materi di alam semesta dapat terbentuk terus-menerus
 - materi-materi di alam semesta akan mengkerut kembali sebagai akibat adanya gaya gravitasi
 - seluruh materi dan tenaga yang ada di alam ini berasal dari satu kesatuan berbentuk bola raksasa
 - semua materi di alam semesta ini tampaknya sama walaupun terjadi pergeseran galaksi-galaksi
 - segala sesuatu di alam semesta ini tampaknya sama walaupun terjadi pergeseran galaksi-galaksi

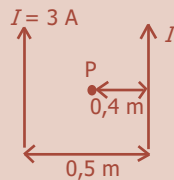
B. Jawablah dengan singkat dan jelas!

- Salah satu ujung seutas kawat digetarkan harmonik oleh tangki, sehingga getaran tersebut merambat ke kanan sepanjang kawat dengan cepat rambat 10 m/s. Ujung kawat mula-mula digetarkan ke atas dengan frekuensi 5 Hz dan amplitudo 0,01 m. Tentukan:
 - persamaan umum gelombang,
 - kecepatan dan percepatan partikel di titik $x = 0,25$ m pada saat ujung kawat telah bergetar 0,1 sekon,
 - sudut fase dan fase gelombang di titik $x = 0,25$ m pada saat ujung kawat telah bergetar 0,1 sekon,
 - beda fase antara titik dengan $x = 0,50$ m dan $x = 0,75$ m!
- Seberkas cahaya monokromatik dijatuhkan pada dua buah celah sempit vertikal yang berdekatan dengan jarak $d = 0,01$ m. Pola interferensi yang terjadi ditangkap pada jarak 20 cm dari celah. Diketahui bahwa jarak antara garis gelap pertama di sebelah kiri ke garis gelap pertama di sebelah kanan adalah 7,2 mm. Berapakah panjang gelombang berkas cahaya tersebut?
- Sebuah lokomotif yang mendekati sebuah bukit dengan kelajuan 40 km/jam membunyikan peluit dengan frekuensi 50 Hz ketika kereta berjarak 1 km dari bukit. Angin dengan kelajuan 40 km/jam bertiup searah gerak dengan kereta.
 - Tentukan frekuensi yang didengar oleh seorang pengamat di atas bukit jika cepat rambat bunyi di udara 1.200 km/jam!
 - Berapakah jarak dari bukit di mana gema dapat didengar oleh masinis kereta?
 - Berapa frekuensi bunyi yang didengar oleh masinis tersebut?
- Pada gambar berikut, dua muatan titik $-q$ dan $+2q$ terpisah sejauh a . Titik A berada di tengah-tengah garis penghubung kedua muatan tersebut dan titik B berada sejauh x dari muatan $+2q$. Agar potensial di titik A sama dengan potensial di titik B, tentukanlah nilai x !



- Sebuah kapasitor $50 \mu\text{F}$ dimuati oleh baterai 12 volt. Kapasitor diputuskan dari baterai dan jarak pisah antara kedua kepingnya dinaikkan dari 2 mm menjadi 3 mm.
 - Berapakah banyaknya muatan yang tersimpan dalam kapasitor?
 - Berapakah banyak energi yang mula-mula tersimpan dalam kapasitor?
 - Berapakah kenaikan energi ketika jarak pisah antara kedua kepingnya diubah?

6. Pada gambar di bawah ini ditunjukkan dua kawat lurus panjang dan sejajar. Kedua kawat dialiri arus 3 A dengan arah saling berlawanan. Tentukan besar induksi magnet di titik P!



7. Sebuah kawat loop segi empat memiliki lebar 1 m, panjang 2 m, massa 1 kg, dan hambatan total 3 ohm. Loop ini dijatuhkan memotong tegak lurus suatu medan magnetik B . Dari pengamatan diperoleh bahwa kecepatan terminal loop (dicapai sebelum kawat bagian atas memasuki medan magnetik) adalah 2 m/s. Hitung besar induksi magnetik B !
8. Sebuah sumber arus sinusoidal AC memiliki frekuensi sudut 200 rad/s, dihubungkan ke ujung-ujung sebuah induktor murni 0,50 H.
- Jika tegangan sesaat AC dinyatakan oleh $v = (100 \sin \omega t)$ volt, dengan t dalam sekon, tentukanlah persamaan arus sesaat I !
 - Jika arus sesaat AC dinyatakan oleh $I = (2 \sin \omega t)$ A, dengan t dalam sekon, tentukanlah persamaan tegangan sesaat v pada ujung-ujung induktor!
9. Seberkas cahaya biru memiliki panjang gelombang 450 nm. Hitunglah energi cahaya biru tersebut jika terdiri atas:
- 1 foton,
 - 2 foton,
 - 3 foton!
10. Unsur Ba^{137} melepaskan foton sinar gamma 0,66 MeV dalam transisi internalnya. Berapakah energi kinetik pantulan atom tersebut?

GLOSARIUM

afinitas elektron	: perubahan energi yang berlangsung bila atom atau molekul memperoleh sebuah elektron untuk membentuk suatu ion negatif
aktivitas radioaktif	: terurainya beberapa inti atom tertentu secara spontan yang diikuti dengan pancaran partikel alfa, partikel beta, atau radiasi gamma
amplitudo	: simpangan maksimum, jarak titik terjauh, dihitung dari kedudukan ke-setimbangan awal
anker	: sauh, alur pada suatu silinder besi, biasanya merupakan tempat kumparan pada motor listrik
arus bolak-balik	: arus listrik yang arahnya selalu berubah secara periodik terhadap waktu
arus induksi	: arus yang ditimbulkan oleh perubahan jumlah garis-garis gaya magnet
arus listrik	: dianggap sebagai aliran muatan positif, karena sebenarnya muatan positif tidak dapat bergerak
atom	: bagian terkecil dari suatu zat, unsur yang tidak dapat dibagi-bagi lagi dengan cara reaksi kimia biasa
beda fase	: selisih fase (tingkat) getar, selisih fase antara dua titik yang bergetar
beda potensial	: selisih tegangan antara ujung-ujung penghantar yang dialiri arus listrik
benda hitam	: benda hipotetis yang menyerap semua radiasi yang datang padanya
bilangan kuantum	: seperangkat bilangan (umumnya bulat atau kelipatan dari $\frac{1}{2}$) yang digunakan untuk menandai nilai khusus suatu variabel, di antara nilai-nilai diskret yang terpilih, yang diperbolehkan untuk variabel itu
daya listrik	: laju perpindahan atau perubahan energi listrik atau besar energi listrik per satuan waktu
defek massa	: penyusutan massa inti atom membentuk energi ikat
detektor	: alat pendeteksi
difraksi	: peristiwa pematahan gelombang oleh celah sempit sebagai penghalang
dilatasi waktu	: selisih waktu dari waktu sebenarnya
dispersi	: peruraian sinar putih menjadi cahaya berwarna-warni
dosis serap	: besar energi yang diserap oleh materi per satuan massa jika materi tersebut dikenai sinar radioaktif
efek fotolistik	: peristiwa terlepasnya elektron dari permukaan logam bila logam dikenai gelombang elektromagnet yang cukup tinggi frekuensinya
eksitasi	: peristiwa meloncatnya elektron dari orbit kecil ke orbit yang lebih besar
elektron	: partikel bermuatan negatif
emisivitas	: perbandingan daya yang dipancarkan per satuan luas oleh suatu permukaan terhadap daya yang dipancarkan benda hitam
energi	: daya kerja atau tenaga
energi listrik	: energi yang tersimpan dalam arus listrik
fluks magnetik	: garis khayal di sekitar magnet dan muatan listrik yang dapat menentukan besar kuat medan magnet dan medan listrik
frekuensi	: jumlah suatu getaran atau putaran setiap waktu
galvanometer	: alat ukur arus listrik yang sangat kecil
garis gaya listrik	: berkas cahaya yang menembus luas permukaan
gaya elektrostatik	: gaya dalam muatan listrik diam
gaya gerak listrik	: beda potensial antara ujung-ujung penghantar sebelum dialiri arus listrik
gaya magnetik	: gaya tarik-menarik atau tolak-menolak yang timbul akibat dua benda yang bersifat magnet saling berinteraksi
gelombang	: usikan yang merambat dan membawa energi
gelombang elektromagnetik	: gelombang yang merambat tanpa memerlukan zat antara

gelombang longitudinal	: gelombang yang arah rambatnya searah dengan usikan atau getarannya
gelombang mekanik	: gelombang yang perambatannya memerlukan zat antara (medium)
gelombang transversal	: gelombang yang arah rambatnya tegak lurus usikan atau getarannya
induksi elektromagnetik	: timbulnya gaya gerak listrik di dalam suatu konduktor bila terdapat perubahan fluks magnetik pada konduktor
induktansi	: sifat sebuah rangkaian listrik atau komponen yang menimbulkan ggl di dalam rangkaian
induktansi diri	: sifat sebuah rangkaian listrik atau komponen yang menimbulkan ggl di dalam rangkaian sebagai akibat perubahan arus yang melewati rangkaian
interferensi	: paduan dua gelombang atau lebih menjadi satu gelombang baru
interferometer	: alat yang dirancang untuk menghasilkan pita-pita interferensi optis untuk mengukur panjang gelombang, menguji kedataran permukaan, mengukur jarak yang pendek
isotop	: nuklida yang mempunyai nomor atom sama tetapi nomor massanya berbeda
kapasitas kapasitor	: kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan listrik
kapasitor	: alat untuk menyimpan muatan listrik
kerangka acuan	: kerangka sudut pandang
kuat medan listrik	: besar gaya listrik per satuan muatan
kuat medan magnetik	: gaya yang bekerja pada satu satuan kutub utara pada titik tertentu pada medan magnet
massa	: jumlah materi dalam benda
medan listrik	: ruangan di sekitar muatan listrik atau benda bermuatan listrik yang masih terpengaruh gaya listrik
medan magnetik	: ruangan di sekitar magnet yang masih terpengaruh gaya magnet
moderator	: pengatur
momentum anguler	: hasil kali antara massa benda dengan kecepatan gerak benda pada gerak rotasi
motor listrik	: alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak
neutron	: partikel tidak bermuatan listrik
nukleon	: partikel penyusun inti atom
orbit elektron	: lintasan elektron
periode	: waktu yang diperlukan benda untuk melakukan satu kali getaran
polarisasi	: pengutupan dua getaran menjadi satu arah getar
potensial listrik	: energi potensial listrik tiap satu satuan muatan
proton	: partikel elementer dengan nomor massa 1 dan muatan listrik positif sebesar muatan elektron
radioaktivitas	: sifat dari sejumlah inti yang tidak stabil, di mana inti-inti itu pecah secara spontan menjadi inti-inti unsur yang lain dan memancarkan radiasi
reaksi fisi	: reaksi pembelahan inti berat menjadi dua buah inti atau lebih yang lebih ringan
reaksi fusi	: reaksi penggabungan beberapa inti ringan disertai pengeluaran energi yang sangat besar
reaktor nuklir	: tempat dilakukannya reaksi inti yang terkendali
relay	: alat yang dikendalikan dengan energi listrik kecil sehingga dapat memutuskan atau mengganti arus lain yang besar dari jarak jauh
sinar alfa	: zarah radioaktif dari inti helium ${}^4_2\text{He}$
sinar beta	: salah satu sinar radioaktif yang keluar dari inti
sinar gamma	: gelombang elektromagnetik dari pancaran inti atom zat radioaktif yang mempunyai panjang gelombang antara 10^{-10} m sampai 10^{-14} m
solenoida	: kumparan dari kawat yang diameternya sangat kecil dibanding panjangnya
spektrometer massa	: alat untuk menguji perbedaan panjang gelombang dalam radiasi elektromagnetik
sudut fase	: sudut yang ditempuh suatu titik selama bergetar harmonik
transformator	: pengubah tegangan listrik bolak-balik agar diperoleh tegangan yang diinginkan

DAFTAR PUSTAKA

- Alan Isaacs. 1994. *Kamus Lengkap Fisika*. Jakarta: Erlangga.
- Alonso, Finn. 1990. *Fundamental University Physics*. New York: Addison Wesley Publishing Company.
- Bridgman, Roger. 2000. *Jendela Iptek Teknologi, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Britannica Encyclopedia. 2006.
- Burnie, David. 2000. *Jendela Iptek Cahaya, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Challoner, Jack. 2000. *Jendela Iptek Energi, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Corrine Stockley, Chris Oxlade, Jane Worthem. 2000. *Kamus Fisika Bergambar*. Jakarta: Erlangga.
- Esvandiari. 2006. *Smart Fisika SMA*. Jakarta: Puspa Swara.
- Fish Bane P.M. 1996. *Physics*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Forum, 11 Agustus 1997.
- Ganijanti Aby Saroyo. 2002. *Seri Fisika Dasar Mekanika*. Jakarta: Salemba Teknik.
- Giancoli, D.C. 2001. *Fisika Jilid 1 terjemahan Yuhilza Hanum*. Jakarta: Erlangga.
- . *Fisika Jilid 2 terjemahan Yuhilza Hanum dan Irwan Arifin*. Jakarta: Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1999. *Fisika Jilid I, terjemahan Pantur Silaban dan Erwin S.* Jakarta: Erlangga.
- Ismail Besari. 2005. *Kamus Fisika*. Bandung: Pionir Jaya.
- Kenneth S. Krane. 1992. *Fisika Modern, terjemahan Han Waspakrik*. Jakarta: UI Press.
- Lafferty, Peter. 2000. *Jendela Iptek Gaya & Gerak, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Lilik Hidayat Setyawan. 2004. *Kamus Fisika Bergambar*. Bandung: Pakar Raya.
- Mary and John Gribbin. 2004. *Jendela Iptek Ruang & Waktu, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Mundilarto. 1992. *Fisika Dasar II*. Jakarta: Universitas Terbuka.
- Norman O. Smith. 1994. *Elementary Statistical Thermodynamics*. New York: Plenum Press.
- Parker, Steve. 2000. *Jendela Iptek Ilmu Kedokteran, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- . 2000. *Jendela Iptek Listrik, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.

- Peter Soedjo. 2004. *Fisika Dasar*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Sears, I.W dan Zemansky, M.W. 1994. *Fisika untuk Universitas, terjemahan Endang Juliastuti*. Bandung: Bina Cipta.
- Serway R.A. 1992. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics Third Edition Update Version Sounders Golden Sun Burst Series*.
- Steve Setford. 1996. *Buku Saku Fakta Sains, terjemahan Hariri*. Jakarta: Erlangga.
- Suroso A.Y, Anna P., Kardiawarman. 2003. *Ensiklopedi Sains dan Kehidupan*. Jakarta: CV Tarity Samudra Berlian.
- Sussana van Rose. 2000. *Jendela Iptek Bumi, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Sutrisno. 1982. *Fisika Dasar*. Bandung: Penerbit ITB.
- Tim Depdiknas. 1979. *Energi, Gelombang, dan Medan*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Tim Depdiknas. *Kurikulum 2004 Mata Pelajaran Fisika SMA/MA*. Jakarta.
- Tim Ensiklopedia. 2005. *Ensiklopedia Iptek untuk Anak, Pelajar, & Umum*. Jakarta: PT Lentera Abadi.
- Tim Ensiklopedi. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 1*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 2*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 3*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 4*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 5*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 6*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 7*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 8*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 9*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- Tipler, P.A. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid 1, terjemahan Lea Prasetyo dan Rahmad W. Adi*. Jakarta: Erlangga.
- _____. 2001. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid 2, terjemahan Bambang Soegijono*. Jakarta: Erlangga.
- Widha Sunarno. 1999. *Pendahuluan Fisika Zat Padat*. Surakarta. UNS Press.
- Wylen. 1992. *Fundamental of Classical Thermodynamics*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Zemansky, M.W. 1992. *Heat and Thermodynamics*. New York: Mc Graw Hill Book Company, Inc.

DAFTAR KONSTANTA

Konstanta-Konstanta Dasar			
Besaran	Simbol	Nilai Pendekatan	Nilai Terbaik yang Terakhir
Laju cahaya di ruang hampa	c	$3,00 \times 10^8$ m/s	$2,99792458 \times 10^8$ m/s
Konstanta gravitasi	G	$6,67 \times 10^{-11}$ Nm ² /m	$6,67259 ((85) \times 10^{-11})$ Nm ² /kg ²
Bilangan Avogadro	N_A	$6,02 \times 10^{23}$ mol ⁻¹	$6,0221367(36) \times 10^{23}$ mol ⁻¹
Konstanta gas	R	$8,315$ J/mol.K = $1,99$ kal/mol.K = $0,082$ atm.liter/mol.K	$8,314510(70)$ J/mol.K
Konstanta Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K	$1,380658(12) \times 10^{-23}$ J/K
Muatan elektron	e	$1,60 \times 10^{-19}$ C	$1,6021733(49) \times 10^{-19}$ C
Konstanta Stefan Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴	$5,67051(19) \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴
Permittivitas hampa udara	$\epsilon_0 = (1/c^2 \mu_0)$	$8,85 \times 10^{-12}$ C ² /Nm ²	$8,854187817... \times 10^{-12}$ C ² /Nm ²
Permeabilitas hampa udara	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A	$1,2566370614... \times 10^{-6}$ T.m/A
Konstanta Planck	h	$6,63 \times 10^{-34}$ J.s	$6,6260755(40) \times 10^{-34}$ J.s
Massa diam elektron	m_e	$9,11 \times 10^{-31}$ kg = $0,000549$ u = $0,511$ MeV/c ²	$9,1093897(54) \times 10^{-31}$ kg = $5,48579903(13) \times 10^{-4}$ sma
Massa diam proton	m_p	$1,67726 \times 10^{-27}$ kg = $1,00728$ u = $938,3$ MeV/c ²	$1,6726231(10) \times 10^{-27}$ kg = $1,007276479(12)$ sma
Massa diam neutron	m_n	$1,6749 \times 10^{-27}$ kg = $1,00728$ u = $938,3$ MeV/c ²	$1,6749286(10) \times 10^{-27}$ kg = $1,008664904(14)$ sma
Satuan massa atom (sma)	u	$1,6605 \times 10^{-27}$ kg = $931,5$ MeV/c ²	$1,6605402(10) \times 10^{-27}$ kg = $931,49432(28)$ MeV/c ²

Daftar Alfabet Yunani

Alpha	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicron	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Y	υ
Iota	I	ι	Phi	Φ	ϕ, φ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

Satuan Turunan SI dan Singkatannya

Besaran	Satuan	Singkatan	Dalam Satuan Dasar
Gaya	newton	N	kg.m/s ²
Energi dan kerja	joule	J	kg.m ² /s ²
Daya	watt	W	kg.m ² /s ³
Tekanan	pascal	Pa	kg/(m.s ²)
Frekuensi	hertz	Hz	s ⁻¹
Muatan listrik	coulomb	C	A.s
Potensial listrik	volt	V	kg.m ² /(A.s ³)
Hambatan listrik	ohm	Ω	kg.m ² /(A ² .s ³)
Kapasitansi	farad	F	A ² .s ⁴ /(kg.m ²)
Medan listrik	tesla	T	kg/(A.s ²)
Fluks magnetik	weber	Wb	kg.m ² /(A.s ²)
Induktansi	henry	H	kg.m ² /(s ² .A ²)

Konversi Satuan (Ekuivalen)

Panjang

1 inci	= 2,54 cm
1 cm	= 0,394 inci
1 ft	= 30,5 cm
1 m	= 39,37 inci = 3,28 ft
1 mil	= 5280 ft = 1,61 km
1 km	= 0,621 mil
1 mil laut (U.S)	= 1,15 mil = 6076 ft = 1,852 km
1 fermi	= 1 femtometer (fm) = 10^{-15} m
1 angstrom (Å)	= 10^{-10} m
1 tahun cahaya (ly)	= $9,46 \times 10^{15}$ m
1 parsec	= 3,26 ly = $3,09 \times 10^{16}$ m

Laju

1 mil/h	= 1,47 ft/s = 1,609 km/h = 0,447 m/s
1 km/h	= 0,278 m/s = 0,621 mil/h
1 ft/s	= 0,305 m/s = 0,682 mil/h
1 m/s	= 3,28 ft/s = 3,60 km/h
1 knot	= 1,151 mil/h = 0,5144 m/s

Sudut

1 radian (rad)	= $57,30^\circ = 57^\circ 18'$
1°	= 0,01745 rad
1 rev/min (rpm)	= 0,1047 rad/s

Volume

1 liter (L)	= 1.000 mL = $1.000 \text{ cm}^3 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
	= 1,057 quart (U.S) = 54,6 inci ³
1 gallon (U.S)	= 4 qt (U.S) = 231 in. ³ = 3,78 L
	= 0,83 gal (imperial)
1 m ³	= 35,31 ft ³

Massa

1 satuan massa atom (u)	= $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
1 kg	= 0,0685 slug
(1 kg mempunyai berat 2,20 lb di mana $g = 9,81 \text{ m/s}^2$)	

Gaya

1 lb	= 4,45 N
1 N	= 10^5 dyne = 0,225 lb

Waktu

1 hari	= $8,64 \times 10^4$ s
1 tahun	= $3,156 \times 10^7$ s

Tekanan

1 atm	= 1,013 bar = $1,013 \times 10 \text{ N/m}^2$
	= 14,7 lb/inci ² = 760 torr
1 lb/inci ²	= $6,90 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
1 Pa	= $1 \text{ N/m}^2 = 1,45 \times 10^{-4} \text{ lb/inci}^2$

Energi dan Kerja

1 J	= 10^7 ergs = 0,738 ft.lb
1 ft.lb	= 1,36 J = $1,29 \times 10^{-3}$ Btu = $3,24 \times 10^{-4}$ kkal
kkal	= $4,18 \times 10^3$ J = 3,97 Btu
1 eV	= $1,602 \times 10^{-19}$ J
1 kWh	= $3,60 \times 10^6$ J = 860 kkal

Daya

1 W	= 1 J/s = 0,738 ft.lb/s = 3,42 Btu/h
1 hp	= 550 ft.lb/s = 746 W

Tabel Periodik Unsur

Tabel Periodik Unsur

38	Ce	Praseodymium
59	Pr	Praseodymium
60	Nd	Niobium
61	Pm	Protactinium
62	Sm	Samarium
63	Eu	Erbium
64	Gd	Gadolinium
65	Tb	Terbium
66	Dy	Dysprosium
67	Ho	Holmium
68	Er	Erbium
69	Tm	Thulium
70	Yb	Ytterbium
71	Lu	Lutetium
90	Th	Thorium
91	Pa	Protactinium
92	U	Uranium
93	Np	Neptunium
94	Pu	Plutonium
95	Am	Americium
96	Cm	Curium
97	Bk	Berkelium
98	Cf	Californium
99	Es	Einsteinium
100	Fm	Fermium
101	Md	Mendelevium
102	No	Nobelium
103	Lr	Lanthanum

90	Th	Thorium
91	Pa	Protactinium
92	U	Uranium
93	Np	Neptunium
94	Pu	Plutonium
95	Am	Americium
96	Cm	Curium
97	Bk	Berkelium
98	Cf	Californium
99	Es	Einsteinium
100	Fm	Fermium
101	Md	Mendelevium
102	No	Nobelium
103	Lr	Lawrencium

☒ Blok s ☐ Blok p ☐ Blok d ☐ Blok f

KUNCI JAWABAN NOMOR GENAP

BAB 1 GELOMBANG

- A. 2. e
4. a
6. b
8. d
10. b
- B. 2. a. 0,2 cm
b. 1,2 Hz
c. 5 cm
d. 6 cm
4. a. 8 rad/s
b. 28 rad/s
c. 18 rad/s

BAB 2 GELOMBANG CAHAYA

- A. 2. b
4. c
6. d
8. c
10. b
- B. 2. $15,6^\circ$
4. a. $3,33 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$
b. $3,33 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$
c. $19,9 \text{ W/m}^2$

BAB 3 GELOMBANG BUNYI

- A. 2. d
4. a
6. b
8. c
10. c
- B. 2. a. 440 m/s
b. $f = 220 \text{ Hz}$
 $\lambda = 2 \text{ m}$
c. $f_1 = 440 \text{ Hz}$
 $f_2 = 660 \text{ Hz}$
4. 765 Hz

BAB 4 LISTRIK STATIS

- A. 2. d
4. a
6. d
8. b
10. a
- B. 2. 16 cm
4. $2 \mu\text{F}$

BAB 5 MEDAN MAGNETIK

- A. 2. b
4. e
6. d
8. b
10. a

- B. 2. a. $4\pi \times 10^{-4} \text{ Hz}$
b. $8\pi \times 10^{-4} \text{ Hz}$
4. 0,1 tesla

BAB 6 INDUKSI ELEKTROMAGNETIK

- A. 2. b
4. d
6. d
8. c
10. a
- B. 2. 62,5 rad/s
4. 9 mH

UJI KOMPETENSI SEMESTER 1

- A. 2. c
4. e
6. d
8. e
10. b
12. e
14. b
16. e
18. b
20. b
22. b
24. e
26. e
28. b
30. a
32. c
34. a
36. d
38. e
40. a
- B. 2. a. 2,8 mm
b. 1,6 mm
4. a. $Q = 1,6 \times 10^{-4} \text{ C}$
b. $E = 3,6 \times 10^7 \text{ N/C}$
6. a. $B_0 = 6,28 \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$
b. $B_p = 1,36 \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$
8. 320 N
10. 60°

BAB 7 ARUS DAN TEGANGAN

- A. 2. b
4. c
6. b
8. a
10. d
- B. 2. $2,5 \times 10^{-5} \text{ Hz}$
4. a. 79,62 Hz
b. 1.600 Hz

BAB 8 RADIASI BENDA HITAM

- A. 2. e
4. a
6. a
8. a
10. b
- B. 2. 300,1 J/s
4. a. $4,0 \times 10^{15}$ J
b. $3,3 \times 10^{19}$ J

BAB 9 FISIKA ATOM

- A. 2. d
4. b
6. e
8. a
10. a
- B. 2. a. 4,77 Å
b. $4,83 \times 10^{-9}$ N
c. $1,59 \times 10^6$ m/s
4. a. 2
b. 10
c. 14
d. 6

BAB 10 RELATIVITAS

- A. 2. d
4. b
6. e
8. b
10. d
- B. 2. 100 kg
4. $\frac{1}{3}\sqrt{8}$

BAB 11 FISIKA INTI DAN RADIOAKTIVITAS

- A. 2. c
4. b
6. e
8. b
10. a
- B. 2. a. $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
b. $6,5 \times 10^{10} \text{ Bq}$
4. 4 jam

UJI KOMPETENSI SEMESTER 2

- A. 2. d
4. a
6. c
8. c
10. e
12. d
14. c
16. d
18. a
20. e
22. c
24. e
26. c
28. b
30. d
32. d
34. d
36. d
38. b
40. c
42. e
44. a
46. b
48. a
50. b
52. a
54. a
56. c
58. d
60. c
- B. 2. 360 nm
4. 0,78 Å
6. $7,5 \times 10^{-6} \text{ Wb/m}^2$
8. a. $I = \sin(200t - 90^\circ)$
b. $V = 200 \sin(200t + 90^\circ)$
10. 1,7 eV

INDEKS

A

absorpsi 44, 45
 afinitas elektron 206, 222, 225, 227
 Albert Michelson 232
 amperemeter 124, 125, 126, 145, 146, 164, 169, 177, 198, 199
 amplitudo 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 27, 28, 32, 37, 46, 32, 57, 58, 60, 61, 69, 71, 72, 73, 76, 78, 158, 165, 166, 174, 204
 anoda 196, 197
 Arthur Holly Compton 200
 arus bolak-balik 97, 126, 140, 141, 142, 152, 157, 158, 159, 162, 163, 165, 170, 172, 174, 175
 arus induksi 134, 135, 136, 139, 141
 arus listrik 26, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 126, 128, 129, 130, 131, 135, 136, 141, 142, 147, 151, 197, 199, 233, 234, 243, 247, 251, 252, 264
 arus puncak 158
 atom 49, 82, 95, 188, 190, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 242, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 263, 265, 266, 267, 268, 269, 271, 272, 274
 audiosonik 59

B

beda fase 8, 9, 10, 15, 18, 37, 161, 163, 167
 benda hitam 55, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 202, 203, 204, 205
 Biot-Savart 115, 128
 bilangan kuantum 195, 206, 208, 213, 217, 218, 219, 220, 225, 227
 Bohr 188, 206, 212, 213, 214, 215, 216, 224, 226, 227, 250

C

cepat rambat 12, 16, 17, 22, 23, 26, 28, 31, 57, 58, 61, 62, 63, 65, 68, 73, 76, 77, 78, 79, 196, 237, 238, 244, 245
 Charles Augustin de Coulomb 83, 87, 106
 cincin geser 126

D

Dalton 192, 207, 208, 223, 225
 daya 8, 9, 32, 42, 50, 55, 49, 70, 71, 77, 79, 82, 97, 143, 144, 145, 160, 169, 170, 171, 174, 176, 177, 191, 192, 193, 204, 205, 213, 222, 256, 257, 263, 269, 273
 defek massa 252, 254
 Democritus 208
 deret radioaktif 259, 271, 273
 detektor 49, 245, 251
 diagram fasor 156, 158, 159, 161, 163, 166
 difraksi 2, 18, 21, 22, 24, 40, 41, 43, 44, 42, 52, 53, 55, 190
 dilatasi waktu 235, 288, 236, 238, 245, 247
 dispersi 2, 19, 21, 24, 33, 35, 36, 52, 54
 Doppler 48, 53, 60, 76, 234
 dosis serap 264, 272, 274

E

echo sounder 74
 Edward Morley 232
 Einstein 196, 197, 198, 224, 228, 229, 230, 233, 235, 242, 244, 245, 246, 251, 252, 266
 elektroda 197
 elektron 82, 95, 122, 131, 149, 158, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 242, 247, 250, 251, 254, 255, 256, 258, 263, 272
 elemen 12, 15, 88, 89, 116, 159, 161, 162, 165, 169, 194, 222, 270
 emisivitas 190, 191, 192

energi ambang 198
 energi ionisasi 208, 206, 221, 222, 223, 225, 226, 227
 energi kinetik 197, 198, 212, 214, 240, 241, 242, 247, 257, 265, 268
 energi listrik 24, 29, 51, 82, 99, 126, 127, 141, 142, 143, 156, 157
 energi potensial 2, 80, 92, 93, 94, 95, 98, 106, 212, 214
 energi relativistik 239, 240, 241, 245

F

faktor daya 169, 170, 171, 177
 fase gelombang 2, 9, 8, 10
 fasor 156, 158, 159, 161, 163, 166, 174
 fluks 82, 87, 88, 89, 106, 134, 135, 136, 137, 142, 143, 147, 148, 150, 151, 152, 153, 191, 264
 fluks magnetik 134, 135, 136, 137, 143, 147, 150, 152, 153
 fluks medan listrik 82, 88
 foton 195, 196, 198, 200, 201, 202, 204, 205, 210, 213, 215, 216, 226, 274
 frekuensi 2, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 27, 28, 32, 37, 48, 49, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 158, 160, 163, 165, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 191, 192, 194, 195, 197, 198, 199, 200, 202, 204, 205, 209, 215, 216, 234
 frekuensi sudut 11, 69, 40, 143, 144, 155, 158, 160, 165, 172, 174, 175

G

galvanometer 110, 126, 129, 140, 197
 garputala 60, 62, 72, 73, 79
 gaya elektrostatis 82, 84, 87, 92, 106
 gaya gerak listrik 132, 134, 135, 141, 152, 153, 174
 gaya inti 254, 272
 gaya Lorentz 120, 121, 122, 124, 128, 129

gaya magnetik 112, 110, 120, 121, 123, 127, 129, 134
 Geiger dan Marsden 208, 209
 gejala Compton 188, 190, 201
 gelombang elektromagnetik 1, 5, 21, 24, 26, 27, 28, 30, 48, 51, 53, 54, 55, 56, 78, 192, 200, 209, 210, 255
 gelombang longitudinal 3, 5, 6, 7, 20, 21, 23, 56, 58, 62, 78
 gelombang stasioner 10, 13, 14, 15, 16, 21, 22
 gelombang transversal 3, 5, 6, 10, 12, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 44, 48, 54, 58, 62, 63, 78, 79
 gema 49, 59, 74, 77
 generator 64, 132, 140, 141, 142, 144, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 162, 170, 174, 269, 271
 generator AC 131, 140, 141, 142, 153, 157, 162, 174
 getaran 2, 3, 5, 8, 16, 17, 20, 21, 23, 27, 44, 58, 59, 60, 62, 65, 66, 69, 72, 78, 151, 195, 209

H

hambatan 100, 131, 135, 136, 139, 141, 144, 151, 158, 168, 169, 173, 175, 176, 177, 198
 hamburan sinar-X 200
 Hans Christian Oersted 26, 112
 Hukum II Newton 122
 Hukum III Newton 14
 Hukum Faraday 134, 137, 143, 150, 152
 Hukum Gauss 80, 87, 89, 90, 106
 Hukum Lenz 135, 136, 152
 Hukum Pergeseran Wien 188, 190, 192, 202
 Hukum Pergeseran Wien 193
 Hukum Rayleigh-Jeans 194
 Hukum Stefan-Boltzmann 190, 192, 202

I

induksi 27, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 126, 128, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 157, 173

induksi magnetik 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 128, 130, 131, 132, 137, 138, 139, 152, 153, 157
 induktansi 134, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 172, 173, 176, 177
 induktor 148, 149, 150, 151, 153, 156, 157, 158, 161, 162, 163, 164, 168, 169, 170, 175, 177
 intensitas 9, 21, 22, 30, 32, 45, 46, 47, 51, 52, 54, 55, 58, 60, 62, 68, 70, 71, 75, 76, 77, 79, 188, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 202, 204, 257
 intensitas gelombang 9, 21, 22, 30, 32, 52, 51, 55, 68, 70
 intensitas radiasi 188, 191, 192, 193, 202
 interferensi 2, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 52, 54, 63, 71, 97, 190, 232, 233
 inframerah 211
 infrasonik 58, 59, 76
 isotop 251, 252, 259, 264, 269, 270

J

James Clerk Maxwell 26, 51
 J.J. Balmer 210
 Joseph Henry 150, 151

K

kaidah tangan kanan 112, 121, 141
 kapasitansi kapasitor 29, 80, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 107
 kapasitor 29, 80, 82, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 107, 108, 109, 142, 156, 157, 158, 162, 163, 164, 165, 168, 169, 172, 173, 174, 175, 176, 177
 kelajuan 12, 13, 17, 19, 23, 28, 32, 33, 45, 48, 53, 73, 126, 215, 216, 227, 233, 240, 245, 246, 247, 266
 komutator 126
 konduktor 90, 96, 97, 99, 124, 125, 134, 137, 139, 142, 152

konstanta Boltzmann 194
 konstanta Rydberg 210, 211, 212, 226
 kontraksi panjang 234, 236, 237, 245
 kuantum 194, 196
 kuat medan 24, 27, 29, 30, 53, 87, 90, 91, 98, 99, 106, 107, 112, 113, 114, 121, 129, 131, 134, 153

L

Laplace 112
 lilitan primer 142, 145, 146
 lilitan sekunder 142, 146
 listrik dinamis 80, 82

M

Marie Curie 256
 massa foton 200
 massa relativistik 239, 240, 245
 Max Planck 194, 195, 202, 212, 224
 medan listrik 5, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 44, 46, 51, 53, 55, 80, 82, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 98, 99, 106, 256, 257
 medan magnet 5, 110, 112, 113, 114, 117, 120, 121, 122, 123, 125, 126, 128, 129, 130, 131, 134, 135, 138, 139, 141, 143, 144, 147, 148, 149, 151, 52, 153, 155, 158, 214, 218, 225, 256, 257, 268
 momentum 200, 202, 212, 213, 217, 218, 219, 225, 226, 227, 228, 239, 240, 242, 245, 247, 265
 motor listrik 110, 126, 127, 129
 muatan listrik 29, 80, 82, 83, 84, 86, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 104, 106, 107, 109, 110, 120, 128, 210, 250, 254

N

neutron 206, 207, 208, 211, 213, 223, 229, 248, 250, 251, 252, 254, 255, 256, 257, 258, 264, 267, 268, 270, 272, 274
 Newton 14, 38, 39, 40, 52, 55, 83, 87, 89, 122, 123, 228, 230, 233, 244, 245

Niels Bohr 224, 250

nomor atom 249, 250, 254, 257,
258, 259, 265, 268, 274

nomor massa 250, 252, 253,
258, 259, 265, 273, 274

O

ohmmeter 126

orbital 206, 214, 217, 218,
219, 220, 225, 227

osilasi 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 21,
27, 37, 58, 69, 182

P

panjang gelombang 3, 4, 5, 6,
7, 10, 11, 12, 13, 14, 17,
18, 19, 22, 23, 26, 27, 28,
32, 33, 38, 40, 41, 42, 44,
46, 48, 49, 50, 54, 55, 59,
64, 65, 66, 67, 68, 74, 75,
77, 78, 79, 173, 190, 191,
193, 194, 195, 196, 198,
200, 201, 202, 203, 204,
205, 210, 211, 212, 213,
215, 216, 226, 227

partikel 2, 4, 5, 8, 9, 14, 15,
17, 23, 46, 58, 59, 69,
121, 122, 125, 130, 190,
207, 208, 209, 223, 230,
231, 237, 239, 240, 241,
245, 250, 251, 254, 255,
256, 257, 258, 264, 267,
272, 274

Paul Ulrich Villard 256

pelayangan 56, 71, 72, 73, 77
peluruhan radioaktif 255, 257,
260

pemantulan 16, 17, 21, 39,
44, 45, 49, 50, 74, 191

permeabilitas hampa udara 113
permeabilitas vakum 26, 30, 114
Pierre Curie 256

Pieter Zeeman 218

pipa organa terbuka 67, 77, 78

pipa organa tertutup 67, 68,
77, 78

polarisasi 20, 21, 22, 24, 44,
45, 46, 47, 54, 55, 78

polaroid 44, 45, 46, 47

proton 82, 95, 207, 208, 209,
213, 223, 241, 242, 247,
250, 251, 252, 254, 255,
256, 257, 258, 265, 271,
272, 274

R

radar 24, 48, 49, 53

radiasi 25, 26, 32, 42, 48, 49,
54, 79, 126, 188, 189,
190, 191, 192, 193, 194,
195, 196, 198, 199, 202,
203, 204, 205, 210, 222,
226, 232, 248, 254, 255,
256, 257, 260, 263, 264,
267, 270, 271, 272

radiasi benda hitam 189, 191,
193, 194, 202, 203

radiasi elektromagnetik 32, 48,
191, 232, 254, 263

radiasi panas 188, 190

radioaktivitas 248, 249, 255,
256, 260

radiografi 50

rapat energi 24, 29, 30, 31,
32, 51, 52, 54, 55

reaksi fisi 248, 267, 268, 269,
270, 272

reaktor nuklir 248, 249, 267,
269, 270

reaksi fusi 243

refleksi 14, 15, 17, 21, 22, 54

refraksi 17, 21, 22

regangan 58, 62

relativitas 48, 126, 228, 229,
230, 233, 234, 235, 237,
239, 240, 242, 244, 245,
246, 252

rotasi 21, 126, 158, 161, 163,
232, 237

Rutherford 206, 208, 209,
212, 224, 226, 250, 251,
252, 256

S

sinar-X 24, 48, 49, 50, 53,
196, 200, 201, 205

sinusoida 4, 8, 12, 27, 28,
157, 158, 159, 160, 166,
174

solenoida 30, 110, 117, 118,
119, 128, 130, 131, 132,
147, 148, 149, 152, 155

sonometer 62, 63

spektrum cahaya 190, 218, 224

stator 126

sudut dispersi 35, 36, 52

sudut hamburan 200

suhu mutlak 190, 191, 192,
193, 202, 203

sumber bunyi 22, 56, 58, 61,
65, 66, 71, 79, 234

superposisi 9, 10, 15, 21, 23,
72, 73

T

taraf intensitas 70, 76, 77, 79

tegangan 4, 62, 78, 79, 95,
102, 108, 129, 142, 143,
144, 145, 152, 153, 154,
155, 156, 157, 158, 159,
160, 161, 162, 163, 165,
167, 168, 169, 170, 172,
174, 175, 176, 177, 197

teori kuantum 194, 202, 203

tetapan Planck 194, 195, 198,
204, 224, 213, 226

Thomson 206, 208, 209, 225

toroida 110, 118, 119, 128,
130, 132, 148, 149, 151,
152, 155, 268

transformasi Galileo 228, 231,
232, 234

transformasi Lorentz 228,
230, 234, 235, 245

transformator 107, 132, 142,
143, 144, 145, 146, 151,
152, 154, 155, 159

transistor 145

U

ultrasonik 58, 59, 74, 75, 76,
77

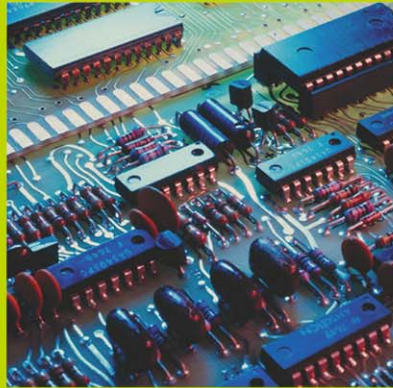
V

voltmeter 124, 125, 126, 145,
146, 164, 169, 174, 177,
198, 199

W

Wolfgang Pauli 203, 220

waktu paruh 250, 260, 261,
262, 263, 272, 273, 274,
240, 241, 242, 249,
251, 252



ISBN 978-979-068-166-8 (no.jld.lengkap)
ISBN 978-979-068-175-0

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

HARGA ECERAN TERTINGGI (HET) Rp. 15.645,-